



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL – RESIDUOS PELIGROSOS

PROPUESTA PARA LA DISPOSICIÓN DE JALES AGOTADOS, PREVIAMENTE
CARACTERIZADOS Y ESTABILIZADOS, EN CAVIDADES MINERAS

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. AMB. JOSÉ JUAN GUTIÉRREZ BAZÁN

TUTOR PRINCIPAL
DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ, F.I. UNAM

COMITÉ TUTOR
DRA. IRMA C. GAVILÁN GARCÍA, F.Q. UNAM
DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ, F.I. UNAM
M. EN E. PATRICIA I. ROMERO MARES, IIMAS UNAM
DR. CARLOS A. LUCHO CONSTANTINO, C.I.Q UAEH

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., OCTUBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. César Valdez Enrique

Secretario: Dra. Gavilán García Irma Cruz

Vocal: Dr. Lucho Constantino Carlos A.

1^{er.} Suplente: M. en E. Romero Mares Patricia I.

2^{do.} Suplente: Dra. Fernández Villagómez Georgina

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería UNAM, Facultad de Química UNAM e Instituto de Geología UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dra. Georgina Fernández Villagómez

FIRMA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios que de alguna manera ha guiado y enseñado mi andar sobre el transcurso del tiempo.

A mis padres y mi abuela que me han brindado su apoyo incondicional y han forjado en mí grandes valores, de igual forma a mis hermanos y al resto de mi gran familia que me tienden la mano cuando lo necesito y me llenan de experiencias gratas.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia en general, porque han forjado en mi la persona que soy, me han enseñado excelentes valores, a no rendirme nunca apoyándome moralmente cuando más lo necesito, además de llenarme de vivencias únicas y de amor incondicional.

A mis amigos y personas que conocí durante la maestría Lalo, Walther, Beto, D'Angelo, Leonel, Clarisa, Arabela, Saira, Nadia, Pedro, Ricardo y al resto de la generación con los que tuve la oportunidad de convivir, me llenaron de gratos recuerdos, gracias por todo.

A mi tutora la Dra. Georgina Fernández Villagómez, que con su gran carisma y paciencia me ha enseñado la importancia de tener una buena educación, humildad, calidez humana y el respeto hacia los demás, creo que es un ejemplo a seguir en muchísimos aspectos, me alegra haberla encontrado como tutora y sobre todo como amiga.

A la Dra. Irma Cruz Gavilán García por el apoyo en la realización de este trabajo y sus observaciones constructivas que sin duda dieron un aporte y enfoque fundamental en el mismo.

Al Dr. Enrique César Valdez por su gran disponibilidad al momento de brindarme asesoría en campos disciplinarios específicos y realizar observaciones valiosas en la estructuración del presente trabajo.

A la M. Patricia I. Romero Mares por su amabilidad al realizar aportes y observaciones en el aspecto estadístico, siendo esta una parte importante de la investigación.

A el Dr. Carlos A. Lucho Constantino por su intervención mediante sus observaciones enriquecedoras y al conocimiento brindado sobre todo en aspectos importantes de la zona de estudio.

Gracias al Posgrado de Ingeniería de la UNAM por servir como medio para cumplir una más de las metas marcadas en mi vida y brindarme esta buena experiencia.

Por último, gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada para realizar estos estudios y al proyecto PAPIIT_IA108117.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: Introducción	1
1.1 Justificación	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Alcances y limitaciones	4
CAPÍTULO 2. Marco teórico.....	5
2.1 Aspectos generales	5
2.1.1 Residuo	5
2.1.2 Residuos Peligrosos (RP)	5
2.1.3 La generación de residuos peligrosos en México	6
2.1.4 Minería	9
2.1.5 Minería en México	10
2.1.6 Regiones mineras metálicas en Hidalgo	11
2.1.7 Impactos de la minería en el ambiente.....	14
2.1.8 Legislación aplicable al cierre de minas agotadas y abandono del lugar	15
2.1.9 Legislación de cierre de minas en el contexto internacional: Estados Unidos, Canadá, Perú y Chile	15
2.1.10 Legislación de cierre de minas en México.....	16
2.1.11 Subsistencia de terrenos.....	18
2.1.12 Restauración de cavidades mineras	19
2.1.13 Jales mineros	20
2.1.14 Manejo de los residuos peligrosos	22
2.1.15 Tecnologías de tratamiento de residuos peligrosos	23
2.1.16 Tecnologías fisicoquímicas	23
2.1.17 Tecnologías biológicas	24
2.1.18 Tecnologías térmicas	24
2.1.19 Solidificación/estabilización (S/E).....	25
2.2 Estudios previos	27

2.2.1 Evaluación de la contaminación del suelo por arsénico, plomo y mercurio en la zona de presa de jales de mina La Prieta en Hidalgo del Parral, Chihuahua.....	27
2.2.2 Inmovilización de sustancias peligrosas a través de solidificaciones monolíticas con diferentes materiales	27
2.2.3 Propuesta para el aprovechamiento de residuos metalúrgicos no ferrosos	28
2.3 Zona de estudio	28
2.3.1 Locación.....	29
2.3.2 Extensión	29
2.3.3 Clima, flora y fauna	30
2.3.4 Suelo	30
2.3.5 Visita a la mina en Zimapán, Hidalgo.....	32
CAPÍTULO 3: Metodología.....	35
3.1 Trabajo de toma de muestra de Jales.....	37
3.2 Caracterización de las muestras de jales	40
3.3 Caracterización granulométrica	41
3.4 Determinación de humedad.....	42
3.5 Determinación de pH	42
3.6 Densidad real o de partículas	43
3.7 Descripción del diseño estadístico de experimentos para la investigación..	44
3.7.1 Unidad experimental	44
3.7.2 Definición de las variables de respuesta	45
3.7.3 Factores y niveles	45
3.7.4 Diseño estadístico experimental	46
3.8 Elaboración de especímenes.....	47
3.9 Prueba de fluidez en la mezcla.....	51
3.10 Prueba de compresión simple	53
3.11 Prueba de intemperismo acelerado	54
3.12 Prueba de lixiviación.....	55

CAPÍTULO 4: Resultados y su evaluación	57
4.1 Resultados de concentración de EPT en jales	57
4.2 Resultados del análisis granulométrico de los jales.....	58
4.3 Determinación del porcentaje de humedad	60
4.4 Determinación de la densidad real de los Jales de Zimapán Hidalgo.....	61
4.5 Determinación de fluidez de morteros	63
4.6 Determinación de pH en jales.....	64
4.7 Pruebas de compresión a especímenes antes y después de la prueba de intemperismo acelerado	65
4.8 Prueba de lixiviación.....	69
 CAPITULO 5: Conclusiones	 74
 Referencias	 77
ANEXOS.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2. Marco teórico.....	5
Figura 2.1. Porcentaje del volumen de RP generado en los Estados con mayor y menor producción.....	8
Figura 2.2. Porcentaje del volumen de RP generado por las industrias con mayor producción en México.....	8
Figura 2.3. Generación de RP en México.....	9
Figura 2.4. Distritos minero-metálicos más importantes de Hidalgo	12
Figura 2.5. Subsistencia minera	19
Figura 2.6. Mapa del Municipio de Zimapán	31
Figura 2.7. Almacén de roca triturada después del proceso de voladura (A) y circuito de banda (B).....	32
Figura 2.8. Esferas de acero usadas en el proceso de molienda (A) y contenedores del proceso de molienda (B).	32

Figura 2.9. Proceso de recuperación de minerales de interés por medio de la técnica de flotación.	33
Figura 2.10. Materia prima recuperada después del proceso de flotación.	33
Figura 2.11. Materia prima obtenida rica en plomo (A), en zinc (B), y en cobre (C).	34
Figura 2.12. Presa de jales vista frontal (A), vista lateral (B) y profundidad (C). 34	

CAPÍTULO 3: Metodología..... 35

Figura 3.1. Diagrama de metodología general del proyecto de investigación....	37
Figura 3.2. Muestras de jales de Zimapán Hidalgo. Muestra 1 (A), muestra 2 (B), muestra 3 (C), muestra 4 (D), muestra 5 (E), muestra 6 (F), muestra 7 (G).	39
Figura 3.3. Posición geográfica de las muestras.	39
Figura 3.4. Proceso de secado de las muestras. Muestra húmeda (A). Muestra seca (B).	40
Figura 3.5. Espectrofotómetro de absorción atómica PEKIN-ELMER 2380.	40
Figura 3.6. Equipo de fluorescencia de rayos X.	41
Figura 3.7. Tamizadora Tyler modelo RX-29(A). Homogeneización de las siete mezclas por el método de cuarteo (B). Muestra compuesta tamizada(C).	42
Figura 3.8. Potenciómetro multiparámetro CONDUCTRONIC pH 120 (A). Vaso de p.p. con sobrenadante para la determinación de pH (B).	43
Figura 3.9. Mezcla en proceso de ebullición (A). Determinación de la densidad real de partículas (B).	44
Figura 3.10. Agregados y jales antes de ser mezclados con agua (A). Llenado de moldes cilíndricos (B).	48
Figura 3.11. Fraguado de especímenes (A). Cuarto de curado (B).	48
Figura 3.12. Desembrado de especímenes, base volumen (izquierdo) y base peso (derecha).	50
Figura 3.13. Mesa de fluidez con platillo de bronce y cono trunco.	52
Figura 3.14. Prueba de fluidez en mortero de relleno.	52

Figura 3.15. Prensa mecánica marca Instron (A). Acondicionamiento de especímenes (B). Fallo del espécimen bajo CMS (C).	54
Figura 3.16. Cámara de intemperismo acelerado (A). Especímenes en cámara de intemperismo acelerado (B).....	55
Figura 3.17. Prueba de lixiviación en partículas de especímenes posterior al intemperis	56
CAPÍTULO 4: Resultados y su evaluación	57
Figura 4.1. Curva granulométrica.	59
Figura 4.2. Resultados de CMS en especímenes antes y después de la prueba de intemperismo acelerado.....	66
Figura 4.3. Resultados de la concentración de As presente en el lixiviado después de la prueba de intemperismo acelerado.....	69
Figura 4.4. Comparación de filtros usados en prueba de lixiviación entre tratamientos.	70
Figura 4.5. Concentraciones de EPT presentes en el lixiviado resultante de los jales sin tratamiento.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2. Marco teórico.....	5
Tabla 2.1. Regiones mineras del Estado de Hidalgo.....	11
Tabla 2.2. Principales minas en explotación de minerales metálicos en el Estado de Hidalgo	13
Tabla 2.3. Unidades minero-metalúrgicas y de transformación metálicos del Estado de Hidalgo	13
Tabla 2.4. Impactos ambientales provocados por las fases de extracción de la minería	
Tabla 2.5. Cuadro comparativo entre la legislación de Estados Unidos, Canadá, Perú y Chile	16
Tabla 2.6. Matriz para la selección de tecnologías de tratamiento para compuestos inorgánicos en suelos, sedimentos y lodos	25

CAPÍTULO 3: Metodología	35
Tabla 3.1. Datos de las muestras de jales de la mina de Zimapan, Hidalgo	38
Tabla 3.2. Factores y niveles del diseño experimental.....	46
Tabla 3.3. Relación de materiales de rellenos en elementos estructurales.....	49
Tabla 3.4. Composición en porcentaje de especímenes JC.	50
Tabla 3.5. Composición en porcentaje de especímenes JCC.....	51
Tabla 3.6. Composición en porcentaje de especímenes JCZ.	51
CAPÍTULO 4: Resultados y su evaluación	57
Tabla 4.1. Concentraciones en ppm de EPT en las muestras de jales.	57
Tabla 4.2. Distribución granulométrica de los jales.	58
Tabla 4.3. Clasificación de arena dependiendo del módulo de finura	59
Tabla 4.4. Pesos obtenidos en la determinación de humedad de la prueba compuesta.....	60
Tabla 4.5. Datos para la determinación de densidad real	62
Tabla 4.6. Diámetros de los morteros por cada tratamiento.....	63
Tabla 4.7. Fluidez obtenida por cada uno de los tratamientos propuestos.	64
Tabla 4.8. Resultados de pH de los jales	65
Tabla 4.9. Análisis de varianza de la CMS posterior al intemperismo acelerado. .	67
Tabla 4.10. Comparación múltiple Tukey de medias de los factores "variante" y "composición" con variable de respuesta CMS.	68
Tabla 4.11. Análisis de varianza de concentración de As en lixiviado posterior al intemperismo acelerado.	71
Tabla 4.12. Comparación múltiple Tukey de medias del factor "composición" con variable de respuesta la concentración de As en lixiviado.	71
Tabla 4.13. Promedio de pH por tratamiento en lixiviado	73



CAPÍTULO 1: Introducción

La minería es una actividad primaria que se refiere a la exploración, explotación y aprovechamiento de los minerales (INEGI, 2010), que deja grandes aportes económicos en la zona donde se desarrolla, sin embargo, en el medio natural el impacto ambiental derivado de sus actividades es perjudicial. Entre los residuos generados en dichas tareas están los denominados jales, colas o relaves que al ser dispuestos sin implementar controles ambientales se dispersan al entorno inmediato afectando al suelo, atmósfera y cuerpos de agua, sin mencionar las posibles repercusiones contra la salud humana (Gutiérrez-Ruíz *et al.*, 2007).

Una vez que son caracterizados, estabilizados y confinados los jales para su disposición dentro de minas, pueden tener un confinamiento seguro, donde el principal objetivo es evitar la lixiviación de elementos potencialmente tóxicos (EPT) y su liberación al ambiente, así como minimizar riesgos generados de subsidencia por huecos como daños materiales bastante cuantiosos y posibles daños a poblaciones aledañas que son provocados por la remoción de suelo para la extracción de minerales (Tomas *et al.*, 2009).

Zimapán, Hidalgo es un distrito minero donde podrían presentarse algunas de las afectaciones a la población y al entorno antes mencionadas. Realizar una propuesta para la disposición de jales en cavidades mineras tomando en cuenta la composición física y química de los jales mineros, previamente caracterizados y estabilizados puede ayudar a efectuar estudios y medidas para prevenir o en el peor de los casos mitigar los impactos ambientales que pueden presentarse derivados de la interacción directa de los jales con el entorno.



1.1 Justificación

Entre los impactos ambientales derivados de una mala disposición final de los residuos generados por la explotación minera, de acuerdo con Ledesma *et al.*, 2004, se encuentran la pérdida de cobertura vegetal, la creación de estructuras poco consolidadas susceptibles a la erosión eólica e hídrica, la liberación de sustancias tóxicas, generación de drenaje ácido de mina (DAM) y lixiviación de metales pesados al exponer los minerales de los yacimientos a un medio oxidante.

El Estado de Hidalgo ha sido durante siglos considerado un importante productor de oro, plata, plomo, zinc y cobre en México, de la explotación minera de recursos metálicos de yacimientos tipo skarn (rocas que contienen minerales calcosilicatados). El gran volumen de los jales generados abarca grandes extensiones de terreno, estos presentan una mineralogía variable y compleja constituida por calcosilicatos, sulfuros y sulfosales, además minerales como el As, Sb, Se, Zn, Cu, Pb, Cd, Bi y Mn destacan por sus altas concentraciones, pudiendo ser considerados elementos potencialmente tóxicos (EPT), desde el punto de vista ambiental (Moreno *et al.*, 2012). Por otra parte, la subsidencia minera, o por construcción de obras subterráneas, consiste en el hundimiento de la superficie del terreno provocado por la deformación y/o colapso de galerías creadas por la extracción de minerales o construcción de túneles, los cuales en ocasiones generan un vacío en las áreas circundantes. Al producirse este fenómeno pueden darse dos situaciones, la primera ocurre en zonas sin riesgo de afectación a población aledaña y la segunda cerca a los mismos establecimientos humanos, de esta última se pueden originar una multitud de consecuencias como hundimientos graves en el terreno, afectaciones físicas en edificaciones y en consecuencia a la economía (Tomás *et al.*, 2009). En julio de 2013 en la comunidad de San Felipe, Zimapán, Hgo. trabajadores perdieron la vida en un derrumbe dentro de la mina, (La Jornada, 2013), esto da como principio el interés del uso de los jales como relleno de mina evitando todos los problemas antes mencionados.



1.2 Objetivos

1.2.1 General

- Realizar una propuesta para la disposición de jales en cavidades mineras tomando en cuenta la composición física y química de los jales mineros, previamente caracterizados y estabilizados.

1.2.2 Específicos

- Investigar referencias tanto en medios impresos como electrónicos sobre la minería en México, legislación nacional aplicable, y técnicas de estabilización relacionadas con las zonas mineras.
- Analizar la composición física y química de los jales de la mina en estudio a través de diversas técnicas analíticas.
- Elaborar un diseño estadístico de experimentos, considerando las diferentes variantes y composiciones empleadas en la fabricación de especímenes.
- Determinar el tratamiento de solidificación/estabilización (S/E) más eficaz para los jales, probando diferentes variantes y composiciones de mezcla entre jal y agregados en especímenes elaborados a nivel laboratorio, sometiéndolos a compresión mecánica simple (CMS) antes y después de un proceso de intemperismo acelerado junto a pruebas de lixiviación aplicadas a partículas de los especímenes, posterior a la prueba de envejecimiento.
- Evaluar los resultados obtenidos aplicando el diseño experimental factorial 3x3 completamente al azar de factores fijos considerando las diferencias significativas entre los distintos tratamientos.



1.3 Alcances y limitaciones

- Inicialmente se trabajó con muestras de jales generados por la actividad de extracción de plomo, cobre y zinc provenientes de una mina de Zimapán, Hidalgo, mismas que fueron colectadas y enviadas por la minera.
- El análisis de las muestras se realizó en el Laboratorio de la Unidad de Gestión Ambiental de la Facultad de Química y en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología de la Universidad nacional Autónoma de México.
- Posteriormente se prepararon especímenes con el fin de contener los EPT presentes en los jales, así mismo se sometieron a pruebas de intemperismo acelerado, CMS y lixiviación, considerando la NOM-141-SEMARNAT-SSA-2004 y la metodología modificada de Cruz *et al.*, 2001 y Benzaazoua *et al.*, 2008. Dichas pruebas se realizaron en la Facultad de Ingeniería, en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM), en el Laboratorio de corrosión del departamento de Mecánica, División de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, y Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería, en la División de Ingeniería Civil y Geomática, respectivamente.
- Un aspecto que considerar en la realización de los especímenes fue que su elaboración no se consideró respecto a peso como en estudios similares, solo con base en volumen basándose en las pruebas presuntivas y en lo establecido en la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, en cuanto a la elaboración de mortero de relleno se refiere.
- Finalmente, cabe mencionar que se contó con una cantidad limitada de muestras de jales, por lo que no se realizaron las pruebas enfocadas con el jal sin tratamiento alguno.



CAPÍTULO 2. Marco teórico

En este capítulo se abordan aspectos importantes de la minería como su legislación, características generales de los sitios donde se desarrolla, definir y saber la fuente de generación de los residuos que se forman derivados de su actividad, e igualmente se describen algunas tecnologías de remediación mostrando sus ventajas, desventajas y algunas de sus aplicaciones, de entre las cuales se enfatiza el método empleado para tratar los residuos del sitio de estudio, así mismo de este último se describen las características principales como su locación, extensión, clima, flora, fauna etc.

2.1 Aspectos generales

2.1.1 Residuo

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), se define como el material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido, o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en esta Ley y demás ordenamientos que de ella deriven.

2.1.2 Residuos Peligrosos (RP)

Los residuos se clasifican en urbanos, de manejo especial y peligrosos, estos últimos también son definidos por la LGPGIR estableciéndolos como aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido



contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en esta Ley.

Otra definición de los residuos peligrosos se establece en la NOM-052-SEMARNAT-2005 donde declara que son el resultado del desecho de productos fuera de especificaciones o caducos, sustancias químicas que han perdido, carecen o presentan variación en las características necesarias para ser utilizados, transformados o comercializados respecto a los estándares de diseño o producción originales.

Sin embargo, el que un residuo sea peligroso no significa necesariamente que provoque daños al ambiente, los ecosistemas o a la salud, porque para que esto ocurra es necesario que se encuentre en una forma "disponible" que permita que se difunda en el ambiente alterando la calidad del aire, suelos y agua, así como que entre en contacto con los organismos acuáticos o terrestres y con los seres humanos (SEMARNAT, 2015).

2.1.3 La generación de residuos peligrosos en México

Los residuos peligrosos en México son generados a partir de una amplia gama de actividades industriales, de agricultura, e incluso domésticas; los riesgos al ambiente y a la salud de este tipo de residuos son un foco de atención no solo en México, sino en el ámbito internacional, esto ha propiciado que se generen disposiciones regulatorias (leyes, reglamentos y normas), que establecen pautas de conducta a evitar y medidas a seguir para lograr un manejo seguro con el fin de prevenir accidentes, a la vez que se fijan límites de exposición o alternativas de tratamiento y disposición final para reducir su volumen y peligrosidad (PROFEPA, 2013).

Los primeros estudios para estimar el volumen de residuos peligrosos generados en el país fueron elaborados en 1994 por el Instituto Nacional de Ecología (INE). A



partir de entonces, las cifras han sido diversas, y se han basado fundamentalmente en la información reportada por las empresas que generan o tratan este tipo de residuos (SEMARNAT, 2012).

La aproximación más reciente sobre el volumen de generación de RP para el país se obtiene a partir de los registros que hacen las empresas incorporadas al Padrón de Generadores de Residuos Peligrosos (PGRP) de la SEMARNAT. Según la información contenida en dicho registro, para el periodo 2004-2011, las 68 733 empresas registradas generaron 1.92 millones de toneladas. Esta cifra, sin embargo, no debe considerarse como el volumen total de RP generados en el país en ese periodo, debido a que el PGRP no incluye a la totalidad de las empresas que producen estos residuos en el territorio. Una de las principales causas de este resultado fue la modificación de la NOM-052-SEMARNAT-1993 (actualmente NOM-052-SEMARNAT-2005) que establece las características de los residuos para ser considerados peligrosos, y de la cual se eliminaron los jales mineros y los recortes de perforación de la industria petrolera, los cuales constituían una importante fracción del total de RP generados reportados en estimaciones anteriores (SEMARNAT, 2012).

En la figura 2.1 se muestran los Estados del país que produjeron mayor porcentaje en volumen de RP (ZMVM, Chihuahua, Campeche, Tamaulipas y Nuevo León); además, también se incluyen aquellos que reportaron menores volúmenes de generación, como lo son Nayarit, Baja California Sur, Chiapas y Tlaxcala (SEMARNAT, 2012).

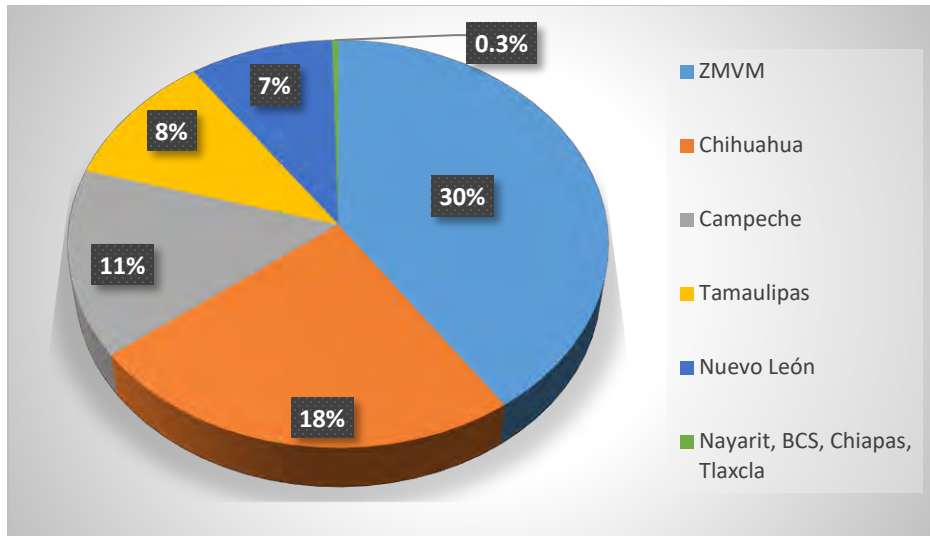


Figura 2.1. Porcentaje del volumen de RP generado en los Estados con mayor y menor producción (Datos graficados de SEMARNAT, 2012).

De acuerdo con la información presentada por la SEMARNAT en 2012, se muestra en la figura 2.2 el porcentaje correspondiente a la producción de volumen total de RP generados por las industrias en el país entre 2004 y 2011.

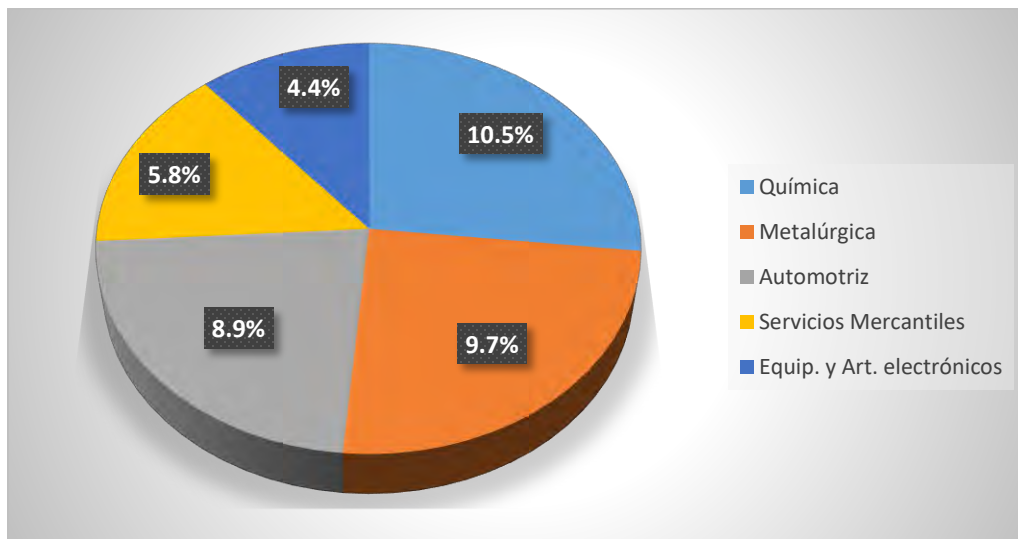
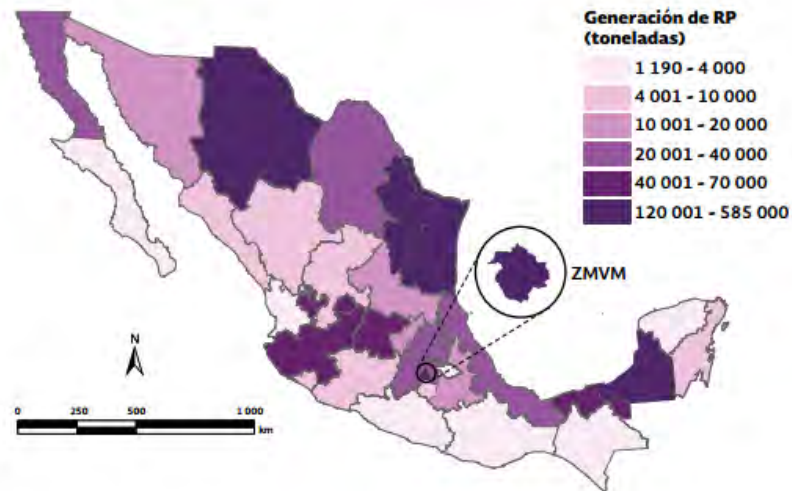


Figura 2.2. Porcentaje del volumen de RP generado por las industrias con mayor producción en México (Datos graficados de SEMARNAT, 2012).

La figura 2.3 muestra la generación de RP reportada por las empresas incorporadas al PGRP por entidad federativa (SEMARNAT, 2012).

Generación de RP reportada por las empresas incorporadas al Padrón de Generadores de RP, 2004 - 2011



Fuente:
Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. Semarnat. México. 2012.

Figura 2.3. Generación de RP en México (SEMARNAT, 2012).

2.1.4 Minería

La minería tal y como lo cita Saavedra y Sánchez en 2008 es una actividad económica que depende de la extracción de recursos no renovables y finitos, su localización está determinada a la presencia de yacimientos minerales que a su vez marcan los ritmos de explotación y los métodos de extracción, así mismo, hace uso intensivo y temporal del espacio, cuyas repercusiones se extienden a largo plazo. En sus primeras etapas de desarrollo, se consideró una actividad extractiva que cambió con la llegada de la Revolución Industrial, ya que en virtud de ser utilizados los recursos minerales necesitan forzosamente de una transformación industrial (Sánchez, 1990; Coll-Hurtado *et al.*, 2002).



2.1.5 Minería en México

En México la minería es una de las actividades económicas de mayor tradición, se practica desde la época prehispánica además de ser fuente de la expansión regional durante el desarrollo de la Nueva España. Ha estado presente en el desarrollo del país como un factor importante de modernización y avance, al suministrar insumos a prácticamente todas las industrias, entre las que destacan las de construcción, metalúrgica, siderúrgica, química y electrónica, también forma parte de la fabricación de artículos de uso cotidiano como lápices, relojes, joyas, televisores, computadoras, automóviles etc. (INE, 2007).

México ocupa el primer lugar en la producción de plata a nivel mundial, se ubica entre los 10 principales productores de 16 diferentes minerales: plata, bismuto, fluorita, celestita, wollastonita, cadmio, molibdeno, plomo, zinc, diatomita, sal, barita, grafito, yeso, oro y cobre. Es el primer destino en inversión en exploración minera en América Latina y el cuarto a nivel mundial de acuerdo con el reporte publicado por SNL Metals y Mining 2015, es el quinto país con el mejor ambiente para hacer negocios mineros, de acuerdo con el reporte de la consultora Behre Dolbear publicado en agosto de 2015. El Sector minero-metalúrgico en México contribuye con el 4 % del Producto Interno Bruto nacional. Al mes de julio de 2015, generó 352 mil 666 empleos directos y más de 1.6 millones de empleos indirectos, de acuerdo con el reporte del Instituto Mexicano del Seguro Social (Secretaría de Economía, 2016).

En México, la existencia de un subsuelo rico en minerales metálicos y no metálicos propició su extracción desde la época prehispánica y la expansión de la actividad minera por casi todo el territorio. La antigüedad de más de cuatro siglos en la explotación de estos recursos ha conferido a la minería el carácter de una actividad de gran tradición, desde la Colonia hasta finales del siglo XIX. En el Estado de Hidalgo, la minería desarrolló y reforzó la actividad económica regional desde el inicio del periodo colonial, propició vínculos funcionales dentro y fuera del país; el desarrollo regional de espacios agropecuarios, forestales, la creación y crecimiento



de la población estuvieron sometidos a la actividad minera dentro del Estado, manteniéndose al mismo tiempo interconectados mediante actividad intensa comercial a través de líneas de flujo internas y externas que surcaban el territorio (Saavedra y Sánchez, 2008).

2.1.6 Regiones mineras metálicas en Hidalgo

Las regiones mineras presentes en el Estado de Hidalgo se han agrupado de acuerdo con el tipo de mineralización, el tipo de yacimiento y su litología. Algunos importantes yacimientos se han explotado desde la época de la Nueva España, de los cuales en la tabla 2.1 se observa con detalle la ubicación la región minera, su distrito, los minerales que se extraen y el tipo de yacimiento, dentro de los cuales a Zimapán se le presta particular interés por ser la zona de estudio de esta investigación.

Tabla 2.1. Regiones mineras del Estado de Hidalgo (Servicio Geológico Mexicano, 2016).

REGIÓN MINERA	DISTRITO MINERO	METAL/METALOIDE	TIPO DE YACIMIENTO
Zimapán	Carrizal, El Monte	Au, Ag, Pb, Zn, Cu	Metasomático
Jacala - Nicolás Flores	Nicolás Flores	Au, Ag, Pb, Zn	Hidrotermal
Molango	Molango, Nonoalco	Mn	Sedimentario exhalativo
Pachuca - Actopan	Pachuca - Real del Monte - Miguel	Au, Ag, Pb, Zn, Cu	Hidrotermal

En la figura 2.4 se observa la ubicación de los distritos minero-metálicos más importantes del Estado de Hidalgo los cuales son Pachuca-Real del Monte, Carrizal, El Monte, Nicolás Flores, Miguel, Nonoalco y Molango, en donde se extraen minerales de interés económico como lo son oro, plata, plomo, zinc, cobre, cadmio, hierro y manganeso.

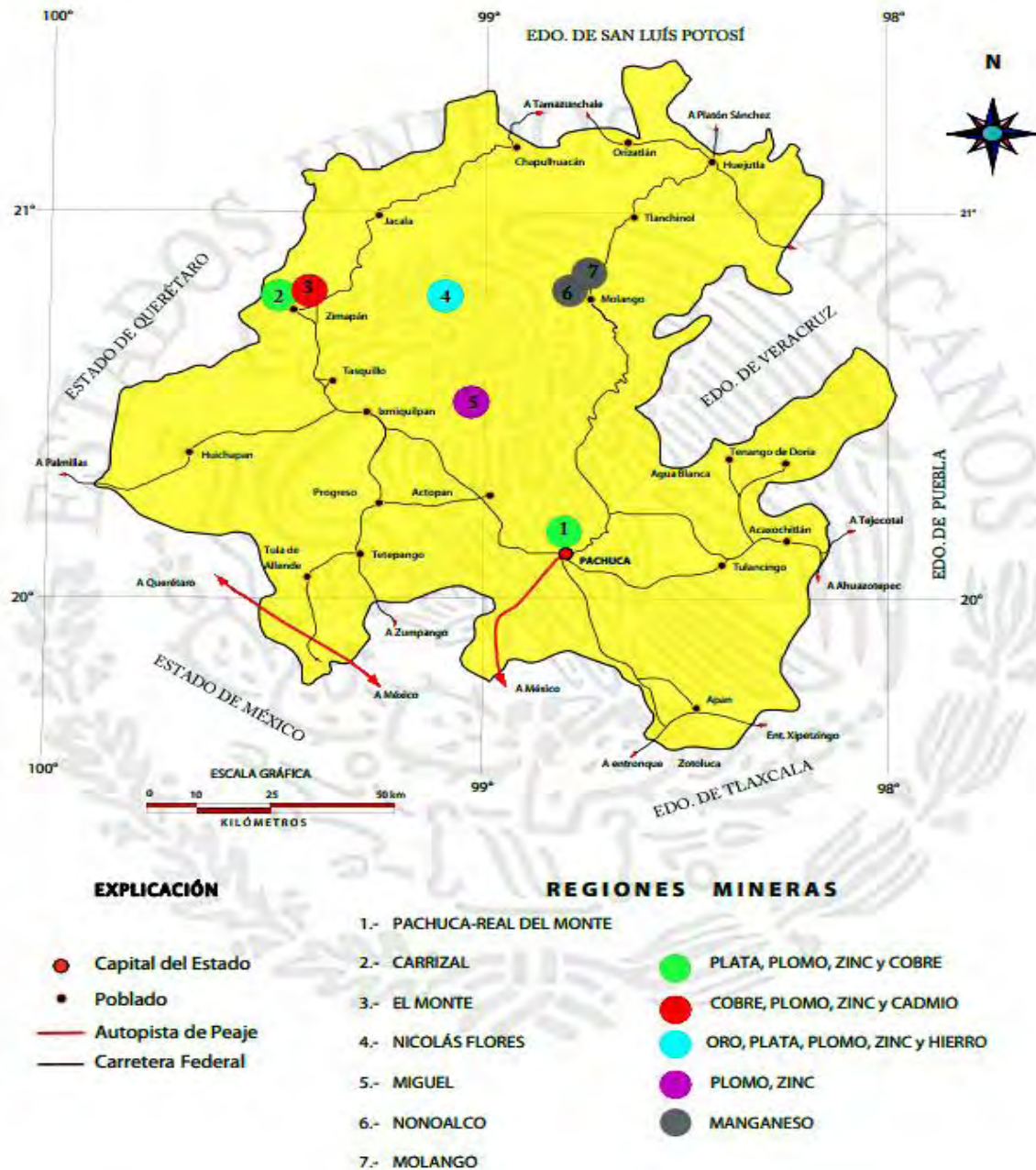


Figura 2.4. Distritos minero-metálicos más importantes de Hidalgo (Servicio Geológico Mexicano, 2016).

La tabla 2.2 muestra las principales minas en explotación con su correspondiente empresa responsable dentro del mismo Distrito minero en Zimapán, Hidalgo.



Tabla 2.2. Principales minas en explotación de minerales metálicos en el Estado de Hidalgo (Servicio Geológico Mexicano 2016).

NOMBRE DE LA MINA	EMPRESA	MUNICIPIO	PRODUCCIÓN T/DÍA	METAL/METALOIDE
El monte	Cia. Carrizal Mining, S.A. de C.V.	Zimapán	2 600	Zn, Cu, Ag
Mina San Juan	Real del Monte y Pachuca, S.A de C.V.	Pachuca	2 000	Au, Ag
Lolotla, Nonoalco, Buenavista	Cia. Minera Autlán, S.A. de C.V.	Lolotla, Nonoalco, Molango	1 700	Mn
Zimapán	Cia. Minera El Espíritu, S. de R.I.	Zimapán	800	Pb, Zn
Zimapán	Cia. Minera y Beneficiadora Purísima, S. de R.I.	Zimapán	1 000	Pb, Zn

De la misma manera en la tabla 2.3 se muestra información de la empresa y el municipio en la que se ubica el mineral comerciable, su producción, así como el proceso de extracción utilizado.

Tabla 2.3. Unidades minero-metalúrgicas y de transformación metálicos del Estado de Hidalgo (Servicio Geológico Mexicano, 2016).

EMPRESA	MUNICIPIO	METAL RECUPERADO	PRODUCCIÓN (T/DÍA)	PROCESO METALÚRGICO
Carrizal Mining S.A. de C.V.	Zimapán	Concentrados de plomo, zinc	2,600	Flotación
Real del Monte y Pachuca S.A.	Pachuca	Oro y plata	2,000	Flotación
Cia. Minera Autlán S.A. de C.V.	Lolotla, Molango, Xochicoatlán	Nódulos de Mn y MnCO ₃	1,713	Flotación Tostación
Comercializadora Zago Import-Export S.A. de C.V.	Zimapán	Concentrados de plomo, zinc	---	Flotación



2.1.7 Impactos de la minería en el ambiente

La industria minera es una de las más antiguas y de mayor utilidad para el hombre, sin embargo, sus actividades causan un alto impacto afectando el ambiente, abarcando diferentes matrices ambientales como lo son el subsuelo, suelo, atmósfera, y cuerpos de agua (INE, 2007). El proceso minero tiene determinadas fases que impactan de manera negativa en el ambiente. En la tabla 2.4 se despliega con detalle cada uno de los procesos de la minería, su descripción y su correspondiente impacto ambiental.

Tabla 2.4. Impactos ambientales provocados por las fases de extracción de la minería (INE, 2007).

FASES	DESCRIPCIÓN	IMPACTO AMBIENTAL
Prospección	Estudios de gravimetría, geología superficial, geoelectrica y de susceptibilidad magnética y densidad.	Impactos ambientales no significativos.
Exploración	Barrenación a diamante, obras y perforaciones directas, construcción de caminos, planillas de barrenación e instalación de campamentos.	Los impactos suelen ser mitigables o sujetas a procedimientos de protección y compensación ambiental.
Explotación	Construcción y obras diversas como tiros, socavones, casa de máquinas y patios de depósito para diversos residuos.	Posible lixiviación en la operación de presa de jales y arrastre de residuos metalúrgicos mediante aguas residuales en cuerpos de agua receptores.
Beneficio	Se define el método de concentración de minerales idóneo, generalmente por trituración y molienda, acompañado de tratamientos previos a una fusión primaria o electrodeposición.	Se genera ruido, vibración y emisión de polvo (efectos de bajo impacto). El tratamiento de beneficio puede tener generar aguas residuales, residuos peligrosos y en ocasiones emisiones a la atmósfera.
Fundición y refinación	Obtención de metales y sus aleaciones para uso industrial. Eliminación de impurezas en los metales obtenidos.	Generación de emisiones a la atmósfera, residuos peligrosos y aguas superficiales.

El desarrollo y modernización de este sector en ocasiones lleva implícitas perturbaciones en la ecología, que no deben ser soslayadas en el diseño y ejecución políticas para la mejora en este sector en términos ambientales, esto implica plantear objetivos orientados hacia el desarrollo sustentable de esta actividad,



dando cumplimiento al compromiso adoptado por México en la Cumbre de la Tierra (INE, 2007).

2.1.8 Legislación aplicable al cierre de minas agotadas y abandono del lugar

La minería como actividad económica posee una serie de características que la hacen diferente a otros sectores industriales de tipo extractivo, una de las principales es la limitación de su producción en el tiempo, es decir, utilizar como materia prima un recurso natural no renovable y su etapa productiva es finita. Esta particularidad le impone al sector un final del ciclo caracterizado por una disminución de los rendimientos económicos, acompañado de unos requerimientos financieros y ambientales por parte del plan de cierre de la mina y de los requerimientos de monitoreo post cierre (Escobar y Betancur, 2014).

El cierre de una mina es un tema estratégico de planeación y programación, las mejores prácticas exigen que éste sea diseñado desde el inicio de operación de sus actividades, con la visión de reintegrar el predio utilizado al entorno natural o urbano mediante diversas acciones para subsanar el impacto ecológico que pueda derivarse. Para evitar tales impactos, previo y durante el cierre deben realizarse trabajos de remediación, mientras que posterior a este se implementa principalmente monitoreo y mantenimiento ambiental (SEMARNAT, 2014).

2.1.9 Legislación de cierre de minas en el contexto internacional: Estados Unidos, Canadá, Perú y Chile

La legislación internacional de estos cuatro países se aborda de manera comparativa en la tabla 2.5 tal y como lo describe Escobar y Betancur en 2014.



Tabla 2.5. Cuadro comparativo entre la legislación de Estados Unidos, Canadá, Perú y Chile (Fuente: Elaboración propia con información de Escobar y Betancur en 2014).

PAÍS	DESCRIPCIÓN
Estados Unidos	El primer instrumento para el control del cierre y abandono de minas (de carbón) fue la "Surface Mining Control and Reclamation Act". Para roca dura (no carbonífera) la responsabilidad legislativa reposa sobre los Estados, no existe ley Federal, solo Arizona mantiene un sistema unificado a este último. Las empresas mineras son responsables de mostrar garantías financieras con objeto de asegurar el cumplimiento de los planes de cierre y abandono. El programa "Abandoned Mine Land" promueve la recuperación de minas abandonadas, el cual está en uso por las principales agencias mineras estadounidense (BLM, EPA, MSHA, NPS, OSM, USGS y USACE).
Canadá	El gobierno Federal por medio de la Ley de Aguas y las Juntas de Agua conformadas exige una garantía de hasta el 10% del valor total del proyecto. En la totalidad de las provincias es obligación presentar planes de cierre y abandono de minas y de la presa de relaves, los planes se acompañan con garantías constituidas mediante bonos que difieren entre provincias. Las exigencias del plan de cierre de minas se plantean dentro del proceso de licenciamiento, integrando actividades de manejo de impactos ambientales desde etapas tempranas.
Perú	Cuenta con una ley específica de cierre y abandono de minas representado por la Ley N.º 28090 de 2003 reglamentada posteriormente por el Decreto Supremo N.º 033 de 2005, también cuenta con una guía para la elaboración de los planes expedida por el Ministerio de Energía y Minas (no obligatoria). El plan de cierre no difiere mucho a lo exigido en Canadá y Estados Unidos como el planificarlo desde el principio, reportar semestralmente los avances de recuperación consignadas y construir una garantía ambiental que cubra el valor total estimado para el plan del cierre.
Chile	Se rige por la Ley N.º 20551 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras en forma sostenible, es exigible para todas las minas y los planes deben ser aprobados por el SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería). La construcción de la garantía se basa en los costos de las medidas del cierre además del seguimiento y control requeridas en el post-cierre. El Estado devuelve la garantía cuando se cumple con lo estipulado. Cuando las producciones son inferiores a 10.000 toneladas/año, no es necesario constituir garantías financieras.

2.1.10 Legislación de cierre de minas en México

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la dependencia encargada de la regulación para la protección del ambiente, obtención de permisos ambientales para las diferentes etapas de operación de la mina y de la conservación de áreas naturales protegidas.

La guía para la presentación de la manifestación de impacto ambiental, minero, modalidad particular de la SEMARNAT en 2002, señala que para la etapa de post-operación o abandono del sitio se debe presentar la descripción de un programa tentativo, en el cual se haga énfasis en las medidas de rehabilitación, compensación y restitución. Cuando, por algún motivo, se dejen de generar residuos peligrosos o se cierren las instalaciones donde éstos se generan, se deberá avisar por escrito a la SEMARNAT, con la información proporcionada se podrá ordenar la inspección



física de las instalaciones y del sitio con el fin de verificar que se hayan observado las disposiciones aplicables (SEMARNAT, 2014).

Así mismo, se deben observar las especificaciones y criterios de cierre y post-cierre establecidos en la NOM- 141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto construcción, operación, y postoperación de presas de jales, en el apartado 5.7 contempla los criterios de postoperación para la presa de jales y el 5.8 se refiere al monitoreo de la misma; en caso de presentar las características establecidas en el punto 5.4.2, el generador debe entregar a la autoridad competente antes de iniciar la operación de la presa de jales, un programa de monitoreo que permita evaluar la eficacia de las acciones de protección aplicables.

En la NOM-155-SEMARNAT-2007, que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata, en su apartado 5.9 se establecen los criterios para el cierre del patio y en el 5.10 el monitoreo, abarcando el de cuerpos de aguas superficiales, subterráneos y dispersión de partículas.

También en la NOM-157-SEMARNAT-2011 en el apartado 5.6 se marcan los criterios para el almacenamiento y disposición final de los residuos, en cual se en los puntos 5.6.1 y 5.6.2 la identificación de los elementos del ambiente presentes en el sitio en que se depositarán los residuos, aquéllos que sean susceptibles de afectación por los impactos generados por la disposición de residuos, así como la capacidad del entorno para atenuar dichos impactos, conforme al estudio de la caracterización del sitio del numeral, como también que durante el proyecto, construcción, operación y cierre de los depósitos de almacenamiento y disposición final de residuos, se deberán contar con las especificaciones de ingeniería y mantenimiento que aseguren su estabilidad física.



De igual forma en la NOM-159- SEMARNAT-2011 se establecen los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre, en su apartado 5.8 se refiere a los criterios de cierre, englobando apartados como la estabilidad química, estabilización del sistema de lixiviación, estabilización física, prevención de dispersión de contaminantes y medidas para la restauración del sistema de lixiviación. De manera similar las normas antes mencionadas, en el apartado 5.9 de esta norma se toman en cuenta aspectos del monitoreo durante la construcción, operación y cierre del sistema de lixiviación, mientras que en el apartado 5.10 se plantea el monitoreo posterior al cierre.

2.1.11 Subsistencia de terrenos.

La subsidencia del terreno es un riesgo natural que afecta a amplias zonas del territorio en las que se presentan daños económicos y una gran alarma social, puede deberse a numerosas causas, como la disolución de materiales profundos, la construcción de obras subterráneas o de galerías mineras, la erosión del terreno en profundidad, el flujo lateral del suelo, la compactación de los materiales que constituyen el terreno o la actividad tectónica. Todas estas causas se manifiestan en la superficie del terreno mediante deformaciones verticales que pueden variar desde pocos milímetros hasta varios metros durante periodos que varían desde minutos hasta años (Tomás *et al.*, 2009).

Tomás *et al.*, 2009 encontraron que la subsidencia minera se puede generar por construcción de obras subterráneas como galerías o la construcción de túneles para la extracción de minerales, generando el hundimiento de la superficie del terreno a consecuencia de la deformación y/o colapso del suelo al intentar ocupar el vacío generado de los terrenos circundantes. Esta situación se muestra en la figura 2.5.

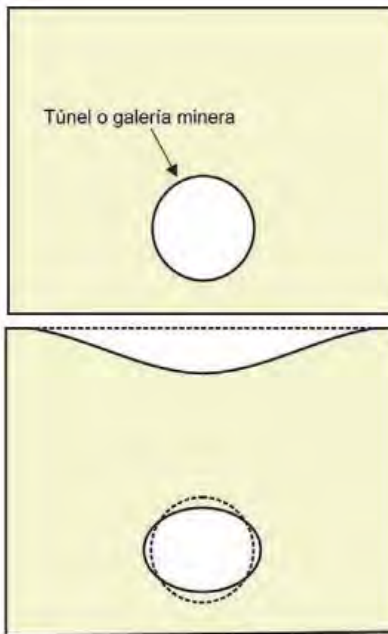


Figura 2.5. Subsistencia minera (Tomás *et al.*, 2009).

Otra consecuencia de la subsidencia por huecos es el peligro para la población, principalmente cuando las actividades de los habitantes se realizan en o alrededor de estas zonas. Dicho fenómeno afecta las viviendas ubicadas sobre cavernas subterráneas artificiales que representan un riesgo (físico, social, económico, político, jurídico y urbano) para la población que las habita. La amenaza de subsidencia minera se convierte en un riesgo cuando la población se asienta en lugares con túneles mineros subterráneos, es decir, el peligro es producto de las acciones de una población sobre la naturaleza (Sánchez y Reséndiz, 2016).

2.1.12 Restauración de cavidades mineras

Las cavidades producidas por la minería se generan por dos tipos de explotación: “a cielo abierto” y subterránea, cada una con problemáticas diferentes. Entre los impactos ambientales de la minería a cielo abierto se pueden mencionar el impacto paisajístico, su peligrosidad para personas y ganado, la pérdida de terrenos para su



aprovechamiento agrícola, y la posibilidad de formación de lixiviado en su fondo, esto se refiere a las actividades que se realizan en el entorno de lo que sería el proyecto minero el cual entra en conflicto con alguna de estas actividades. La minería subterránea presenta sobre todo riesgos de subsidencia, que pueden afectar a las poblaciones asentadas sobre la zona explotada. También puede existir peligro de caída de personas y ganado (pozos abiertos), y de contaminación de acuíferos. Por lo tanto, considerando sus diferencias morfológicas, la restauración de unas u otras será también diferente, requiriendo de condiciones y tecnologías distintas (Higuera *et al.*, 2011).

En lo que se refiere a cavidades subterráneas Higuera *et al.* (2011) consideran que su restauración dependerá de la problemática específica. Si no causan problemas de subsidencia, puede ser suficiente con un sellado adecuado de los pozos que puedan quedar abiertos y ser susceptibles de caídas. Los mismos pozos a menudo presentan peligro de colapso en su embocadura, produciéndose un embudo de varios metros de diámetro a su alrededor, así pues, el sellado de la boca debe tener en cuenta esta posibilidad, y reforzar la estructura de ésta para evitarla. También las galerías pueden colapsar, tanto en el entorno inmediato de la embocadura como a lo largo de su trazado, lo cual es mucho más peligroso, pues puede dar lugar a la formación de un pozo. Cuando existen problemas de subsidencia, la única solución es rellenar la cavidad, de ser posible con materiales compactos (cemento), lo cual sin duda representa un costo económico que hace necesario realizar un estudio para minimizar dichos costos llevando a cabo el relleno de forma racional.

2.1.13 Jales mineros

Como se mencionó previamente la industria minera ocasiona una gran cantidad de impactos al ambiente, entre ellos destaca la generación de residuos que se derivan de su actividad, tales pueden ser sólidos, líquidos y gaseosos, principalmente en forma de gases, humos, partículas, aguas residuales y jales (colas y relaves), además de aceites, llantas, plásticos, entre otros (INE, 2007).



La NOM-141-SEMARNAT-2003 define a los jales como "todos los residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales", mientras que el Instituto Nacional de Ecología los define como aquellos que son generados durante los procesos de recuperación de metales a partir de minerales metalíferos tras la molienda de las rocas originales que los contienen y la mezcla de partículas que se forma con agua y pequeñas cantidades de reactivos químicos que facilitan la liberación de los metales, normalmente se encuentran en forma de lodos o de una mezcla líquida de materiales finos que en cierta manera se comporta como un suelo.

Ramos *et al.*, (2004) cita que en el Manual de Presa de Jales de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2000) los métodos de construcción de las presas de jales que se han aplicado en México son: (i) depósito de materiales sólidos en aguas profundas aisladas de la presencia de oxígeno, para zonas costeras, y (ii) depósito subaéreo de lodos, donde se drena el agua y se retienen los materiales sólidos; este último tiene las variantes de descarga por adelgazamiento central, de aguas abajo y aguas arriba. El método subaéreo consiste en la construcción de una cortina de retención de sólidos con clastos gruesos para que el agua drene libremente.

El INE en 2007 maneja el concepto de sostenibilidad en relación con la minería, obliga a reconocer la importancia de este sector en la economía de México, pero también a analizar las afectaciones más importantes al ambiente, incluidas la generación de residuos peligrosos y la relación con todos o alguno de los siguientes fenómenos:

- Destrucción de la capa de suelo, flora y fauna durante el descapote.
- Formación de *terreros* y movimientos de sedimentos hacia cuencas del área.
- Oxidación de los minerales insolubles y formación de sustancias solubles ácidas con alto contenido de metales (drenaje ácido de mina).
- Alto consumo de agua.



- Descarga de lixiviados con presencia de iones metálicos y reactivos tóxicos. En el caso de la hidrometalurgia el pH es muy ácido y la toxicidad mucho más elevada que en la flotación.
- Generación de *jales* como remanente del beneficio.
- Generación de aceites gastados, llantas, disolventes, polímeros, etcétera.
- Generación de ruido y emisiones (polvos, gases y humos).
- Generación de basura doméstica.
- Lodos de plantas de tratamiento de agua doméstica.

2.1.14 Manejo de los residuos peligrosos

De acuerdo con la PROFEPA en 2013 la contaminación causada por la disposición inadecuada de residuos peligrosos hizo que en México las autoridades ambientales, dieran una alta prioridad a su manejo. El manejo de los residuos peligrosos incluye los procesos de minimización, reciclaje, recolección, almacenamiento, tratamiento, transporte y disposición. Actualmente, los países industrializados tienden a promover la minimización y reciclaje de los residuos peligrosos como la opción de manejo desde el punto de vista ambiental. Existen varias alternativas para el manejo de los residuos peligrosos, que se dosifican de la siguiente forma:

Reciclaje: La alternativa más productiva es la que después de un proceso específico convierte a los residuos peligrosos en materia prima que se puede utilizar después en otro proceso productivo diferente.

Destrucción: También existe la opción de destruir los residuos peligrosos, al hacerlo las cenizas generadas pueden ser confinadas de una manera mucho más práctica y así ser clasificados como residuos estabilizados. Un ejemplo son medicamentos caducos o fuera de especificaciones.



Confinamiento: Los residuos peligrosos se destoxifican, se separan y concentran los componentes peligrosos en volúmenes reducidos y finalmente se estabilizan para evitar la generación de lixiviados.

2.1.15 Tecnologías de tratamiento de residuos peligrosos

De acuerdo con Volke *et al.* (2005), el término "tecnología de remediación" se refiere como el uso de cualquier operación unitaria o conjunto de ellas, que altere la composición de un contaminante peligroso a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan su toxicidad, movilidad o volumen en la matriz o material contaminado. Existen diferentes tecnologías que permiten dar un adecuado manejo a este tipo de residuos.

2.1.16 Tecnologías fisicoquímicas

Los tratamientos fisicoquímicos utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para transformar, separar o inmovilizar el contaminante. Son tratamientos económicamente factibles y la mayoría se encuentra disponible comercialmente, por lo cual son las técnicas más empleadas para la remediación de diferentes matrices contaminadas con residuos peligrosos desde hace décadas. Estas tecnologías involucran una variedad de procesos como: filtración, neutralización, precipitación oxidación/reducción, sorción, evaporación y floculación, entre otros. Algunos de estos procesos pueden emplearse para el tratamiento de suelos contaminados con EPT, por ejemplo: oxidación/reducción (transformación), lavado de suelos (separación) y solidificación/estabilización (inmovilización) (Volke *et al.*, 2005).



2.1.17 Tecnologías biológicas

De acuerdo con Volke *et al.* (2005), este tipo de tecnologías son una variedad de sistemas que utilizan el potencial metabólico de organismos vivos (plantas, hongos y bacterias, entre otros) para limpiar ambientes contaminados. En el caso de procesos biológicos se enfocan, principalmente, en la degradación de compuestos orgánicos; sin embargo, se ha demostrado que es posible llevar a cabo la remediación de sitios contaminados con metales por vía microbiana, básicamente a través de cambios en el estado redox, es decir, para este caso los sitios contaminados con metales los microorganismos pueden modificar su movilidad en el ambiente a través de cambios en sus características físicas o químicas.

2.1.18 Tecnologías térmicas

Los tratamientos térmicos ofrecen tiempos muy rápidos de limpieza, pero son generalmente los más caros. Sin embargo, estas diferencias son menores en las aplicaciones *ex situ* que *in situ*. Los altos costos se deben principalmente a la implementación para la energía y equipos, además de ser intensivos en mano de obra. Al igual que las tecnologías fisicoquímicas y a diferencia de las biológicas, los procesos térmicos incluyen la destrucción, separación e inmovilización de contaminantes. Los procesos térmicos utilizan la temperatura para incrementar la volatilidad (separación), quemado, descomposición (destrucción) o fundición de los contaminantes (inmovilización). Las tecnologías térmicas de separación producen vapores que requieren de tratamiento; las destructivas producen residuos sólidos (cenizas) y, en ocasiones, residuos líquidos que requieren de tratamiento o disposición. Es importante hacer notar que, para ambos tipos de tratamiento, el volumen de residuos generados que requieren de tratamiento o disposición es mucho menor que el volumen inicial (Volke *et al.*, 2005).

En la tabla 2.6 se puede observar las diferencias entre estos tipos de tecnologías, así como sus ventajas y desventajas.



Tabla 2.6. Matriz para la selección de tecnologías de tratamiento para compuestos inorgánicos en suelos, sedimentos y lodos (INECC, 2004).

TECNOLOGÍA	DESARROLLO	USO	COSTOS	FIABILIDAD	TIEMPO	FUNCIÓN *	APLICACIÓN
Tratamientos fisicoquímicos							
Separación electrocinética	Completo	Limitado	Malo	Regular	Regular	E	Metales y compuestos orgánicos polares
Inundación	Completo	Limitado	Regular	Regular	Regular	E	COV, COSV, metales y metaloides
Lavado	Completo	Limitado	Regular	Regular	Bueno	E	
Solidificación/estabilización	Completo	Amplio	Bueno	Bueno	Bueno	I	Metales y desechos radioactivos
Extracción química	Completo	Amplio	Regular	Regular	Bueno	E/D	COV, COSV, metales y metaloides
Reducción/oxidación química	Completo	Amplio	Regular	Bueno	Bueno	E	Remediación de suelos. No genérica
Separación magnética física	Completo	Amplio	Regular	Regular	Bueno	E	Metales
Tratamientos biológicos							
Fitorremediación	Completo	Regular	Bueno	Regular	Malo	E/I	Metales y metaloides
Biorreactores (lixiviados o lodos)	Completo	Amplio	Bueno	Regular	Regular	E	COV, COSV, materia orgánica
Tratamientos térmicos							
Descontaminación por gas caliente	Piloto	Regular	Bueno	Malo	Bueno	E	COV, COSV, materia orgánica
Incineración	Completo	Amplio	Malo	Malo	Bueno	E	
Desorción térmica	Completo	Amplio	Regular	Malo	Bueno	E	
Otros tratamientos							
Excavación y disposición	Bueno	Amplio	Bueno	Bueno	Bueno	E/I	Metales y metaloides. Residuos previamente estabilizados.
Cubierta de los residuos	Bueno	Amplio		Bueno	Malo	E/I	

Acotaciones: E: extracción; I: inmovilización; D: destrucción.

2.1.19 Solidificación/estabilización (S/E)

La EPA mediante “A Citizen’s Guide to Solidification and Stabilization” en 2012 define la solidificación/estabilización como un grupo de métodos de limpieza que previenen o ralentizan la liberación de químicos dañinos a partir de desechos, como suelo, sedimentos y lodo contaminados. Estos métodos generalmente no destruyen los contaminantes, en cambio, evitan que se "filtren" por encima de niveles seguros en el entorno circundante. La lixiviación ocurre cuando el agua de la lluvia u otras fuentes disuelve contaminantes y los arrastra hacia las aguas subterráneas o sobre



la tierra hacia lagos y arroyos. La solidificación une los desechos en un bloque sólido de material y lo atrapa en su lugar forman bloques menos permeables al agua que los desechos, así mismo la estabilización causa una reacción química que hace que los contaminantes sean menos propensos a ser lixiviados en el medio ambiente. A menudo se usan en conjunto para evitar que las personas y la vida silvestre se expongan a contaminantes, particularmente metales y contaminantes radioactivos. Sin embargo, ciertos tipos de contaminantes orgánicos, como PCB y pesticidas, también se pueden solidificar.

Las variantes y los materiales más utilizados en esta tecnología de remediación son la solidificación con cemento, la solidificación con cal o agentes puzolánicos, encapsulación termo-plástica y la vitrificación (Volke *et al.*, 2005). La característica importante de la S/E es que no elimina los EPT, sino que evita la liberación de estos en el ambiente atrapándolos en una matriz sólida al mismo tiempo que los convierte en sustancias menos dañinas o menos móviles (EPA, 2012).

Entre las ventajas de este método puede destacarse que es posible utilizar suelos contaminados como material básico para la fabricación de vidrio (vitrificación); puede servir para formar un producto útil (material de relleno para caminos); el contaminante queda estabilizado y aislado y es una tecnología totalmente desarrollada y disponible comercialmente. Dentro de las limitaciones del proceso pueden incluir un aumento significativo en el volumen del material original; el material solidificado no puede ser utilizado como suelo nuevamente y puede impedir el futuro uso del sitio; en el uso de aditivos es necesario deshidratar el suelo y realizar la operación a temperaturas elevadas, limitando su aplicación a suelos contaminados con sustancias o elementos no volátiles; y sus costos son muy elevados debido a que es necesario disponer el suelo estabilizado/solidificado (excepto en la vitrificación *in situ*) (Volke *et al.*, 2005).

En la presente investigación se trabajó con S/E, ya que el objetivo principal es realizar una propuesta para la disposición de jales en cavidades mineras evitando



la liberación de los EPT que estos contiene, para ellos se tomó en cuenta las principales características de este método así como las ventajas y desventajas plasmados en la tabla 2.6 en comparación con otras tecnologías para tratar este tipo de residuos, de igual forma se consideró la línea de investigación sobre la cual parte, en los trabajos de Barraza en 2015, González en 2012 y González en 2016.

2.2 Estudios previos

2.2.1 Evaluación de la contaminación del suelo por arsénico, plomo y mercurio en la zona de presa de jales de mina La Prieta en Hidalgo del Parral, Chihuahua

Barraza (2015) en su trabajo de tesis tuvo como objetivo principal evaluar la contaminación del suelo por metales pesados y metaloides en la zona de Hidalgo del Parral, Chihuahua en la mina "La Prieta" a partir de un diseño de muestreo exploratorio de residuos mineros, basándose en la norma mexicana para suelos NMX-AA-132-SCFI-2006. Para ello se realizó un muestreo en la zona, considerando el historial de contaminación además de realizar el análisis de las muestras mediante técnicas instrumentales, y finalmente proponer medidas para la reducción de peligro, dependiendo de la concentración de metales pesados y metaloides presentes en las muestras analizadas de las zonas estudiadas.

2.2.2 Inmovilización de sustancias peligrosas a través de solidificaciones monolíticas con diferentes materiales

González (2012) planteó la evaluación, la inmovilización y reúso de sustancias peligrosas a través de solidificaciones monolíticas con zeolita y diferentes materiales, mediante pruebas en laboratorio, para ello se buscaron las mejores características de los monolitos elaborados mediante la aplicación de pruebas de compresión mecánica mediante un equipo de compresión axial con la finalidad de



conocer sus resistencias, así mismo se efectuaron pruebas hídras con base en técnicas como Normas Europeas (UNE-EN), normas italianas específicas del ámbito de la conservación (NORMAL) y Reunión Internacional de Laboratorios de Ensayo de Materiales (RILEM). También se realizaron pruebas de lixiviación apegándose a la NOM-053-SEMARNAT-1993, se llevaron a cabo pruebas de intemperismo acelerado en una cámara de meteorización, esto fue con el fin de saber el comportamiento de los monolitos al transcurso del tiempo en condiciones poco favorables. Para finalizar se buscaron las posibles aplicaciones para los monolitos en función de su rendimiento y viabilidad a fin de poder darle un valor económico agregado.

2.2.3 Propuesta para el aprovechamiento de residuos metalúrgicos no ferrosos

González (2016) aborda una alternativa para tratamiento de residuos peligrosos enfocado al tratamiento de los metales no ferrosos contenidos en los jales mineros de la mina “La Prieta”, localizada en Hidalgo del Parral municipio del Estado de Chihuahua. El objetivo principal fue el aprovechamiento de dichos residuos considerando sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Para ello se caracterizaron las muestras provenientes de la mina mediante pruebas analíticas en el laboratorio. También se realizaron pruebas de solidificación/estabilización (S/E) utilizando como matriz diferentes tipos de mezclas como: Cemento Portland Compuesto (CPC)/ zeolita y Cemento Portland Ordinario (OPC)/Arena (esta última realizada en la Universidad de Navarra, Pamplona, España). Los monolitos obtenidos se sometieron a pruebas mecánicas y de lixiviación, así como de intemperismo acelerado para asegurar una buena S/E.

2.3 Zona de estudio

En México el Estado de Hidalgo ha sido durante siglos un importante productor de oro, plata, plomo, zinc y cobre gracias a la explotación minera de recursos metálicos



de yacimientos tipo skarn. Estos han generado un gran volumen de residuos (jales) depositados en presas durante más de 450 años, las cuales no han sido rehabilitadas o restauradas. Los jales presentan una mineralogía variable y compleja constituida por calcosilicatos, sulfuros y sulfosales. Elementos como el As, Sb, Se, Zn, Cu, Pb, Cd, Bi y Mn, destacan por sus altas concentraciones, los cuales pueden ser considerados elementos potencialmente tóxicos (EPT), desde el punto de vista ambiental (Moreno *et al.*, 2012).

En cuanto a la locación, extensión, clima, flora, fauna, y suelos se detalla a continuación, dichos rubros son descritos por el sitio web oficial del municipio de Zimapán (www.zimapan.gob.mx).

2.3.1 Locación

El municipio de Zimapán se encuentra al oeste de la entidad entre los paralelos 20° 39' y 20° 58' de latitud norte y los meridianos 99° 11' y 99° 33' de longitud oeste. En cuanto a su altitud se encuentra entre los 900 y 2,900 msnm, con una superficie de 870.93 km² que equivale al 9.18 % del territorio hidalguense (INEGI, 2010). Limita al norte con los municipios de Pacula y Jacala de Ledezma, al este con Jacala de Ledezma, Nicolás Flores e Ixmiquilpan, al sur con Tasquillo, Ixmiquilpan y Tecozautla y al oeste con el municipio de Tecozautla y el estado de Querétaro.

2.3.2 Extensión

El municipio tiene una extensión territorial de 860.90 kilómetros cuadrados. Su hidrografía entre las corrientes más importantes destacan los ríos Tula, el Amajac y el Metztlán. El río Tula al unirse al río San Juan, toma el nombre de Moctezuma, que es el límite natural con el Estado de Querétaro, por la parte oeste del Municipio. Posteriormente entra en el Estado de San Luis Potosí y forma el río Pánuco. Sólo en época de lluvia se forman pequeños arroyos que riegan algunos sembradíos, como los de Chepinque y Tolimán.



2.3.3 Clima, flora y fauna

El municipio tiene un clima templado, registra una temperatura media anual de 18.3 °C, una precipitación pluvial de 391 milímetros por año y el período lluvioso se presenta de mayo a junio. El clima se encuentra entre semicálido y templado medio. Su flora se caracteriza por contar con poca vegetación, ya que, por estar incrustado en una zona desértica, encontramos enormes extensiones de nopaleras, arbustos bajos, matorral alto, maguey, órganos, cardones, biznagas, huizaches, ortigas y mezquites, mientras que su fauna está integrada por una gran diversidad de mamíferos como el lobo, coyote, tigrillo, tlacuache, liebre, ardilla, zorra, zorrillos, tejones y ratón de campo. También se encuentra una gran cantidad de reptiles como serpientes y ciertas especies de lagartijas. Existen aves de rapiña como el gavilán, águilas, cuervos, lechuzas, también se compone de una gran variedad de aves cantoras como: calandrias, codornices, cenizotes, cardenales y se puede escuchar el bello trinar del jilguero.

2.3.4 Suelo

Las características del suelo pertenecen a la etapa mesozoica, es de tipo semidesértico, es rico en materias orgánicas y nutrientes. En cuanto al uso del suelo, el 51% corresponde al de agostaderos, el 8.7% al forestal, el 3% al agrícola y el 37.3% a otros usos. En la tenencia de la tierra, el 69% corresponde a la superficie ejidal y el 31% a la pequeña propiedad. Su uso y explotación radica principalmente en la minería.

Las primeras minas fueron descubiertas en 1575, lo que originó que este distrito se poblara y posteriormente se levantaron algunas haciendas de beneficio, fundándose el poblado de Zimapán en 1576. En el siglo XVII aumentó su importancia, al ser descubierta la mina Lomo de Toro en 1632, con lo cual inicia el esplendor de este distrito. Durante la Guerra de Independencia (1810) la explotación fue interrumpida



por un período de trece años, después de 1823 se tuvo otra época de esplendor (60 minas).

Algunas de las minas presentes en Zimapán presentan una composición y morfología constituida principalmente por sulfuros y sulfosales: galena (PbS), esfalerita (ZnS), pirita (FeS_2), calcopirita ($CuFeS_2$), arsenopirita ($AsFeS_2$), pirrotita ($Fe_{1-x}S$), bornita (Cu_5FeS_4), estibina (Sb_2S_3) y boulangerita ($Pb_5Sb_4S_{11}$). Entre los minerales no metálicos se encuentra una variedad de minerales de calcosilicatos entre los cuales se observa wollastonita, tremolita, actinolita, augita, granates, hedenbergita, entre otros (Moreno et al., 2012).



Figura 2.6. Mapa del Municipio de Zimapán (INEGI, Google 2016).

2.3.5 Visita a la mina en Zimapán, Hidalgo

A finales del mes de junio se realizó la visita a la mina (sitio de estudio), ubicada en el distrito minero de Zimapán, Hidalgo, en la cual la principal explotación es de plomo, zinc y cobre. El proceso de obtención de los minerales de interés da inicio después del proceso de voladura donde se obtiene fragmentos del yacimiento que posteriormente son trasladados a un almacén con capacidad de 1000 toneladas, consecutivamente pasan por medio de un circuito de bandas (figura 2.7) al proceso de molienda (a través de esferas de acero) dentro de los contenedores mostrados en la figura 2.8.

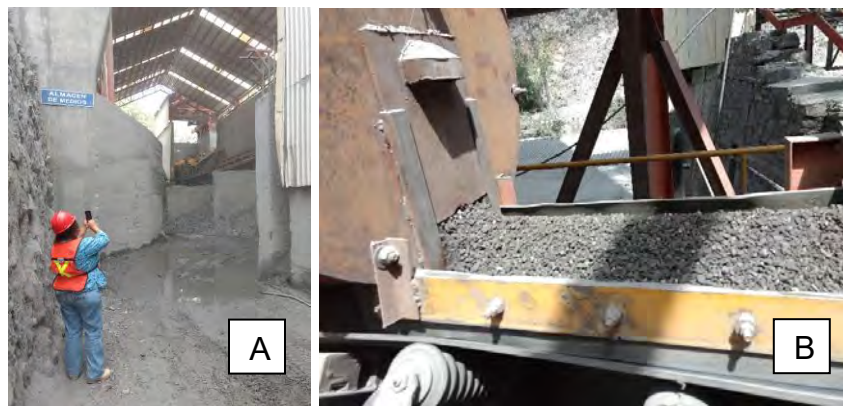


Figura 2.7. Almacén de roca triturada después del proceso de voladura (A) y circuito de banda (B).



Figura 2.8. Esferas de acero usadas en el proceso de molienda (A) y contenedores del proceso de molienda (B).

Al término del proceso de molienda (en el cual se procesas 2800 toneladas por día) la recuperación de los minerales ocurre por medio de la técnica de flotación (figura 2.9) en la cual se utilizan cianuros, sulfato de cobre, sulfato de zinc, cal y espumante en diferentes puntos del proceso. Al finalizar se obtiene materia concentrada de los minerales de valor económico como se presenta en la figura 2.10.



Figura 2.9. Proceso de recuperación de minerales de interés por medio de la técnica de flotación.



Figura 2.10. Materia prima recuperada después del proceso de flotación.

La materia resultante del proceso de flotación tal y como se muestra en la figura 2.11 tiene concentraciones de los minerales extraídos con porcentajes del 45% al 50% para plomo y zinc, mientras que para el cobre solo se recupera un 20%.



Figura 2.11. Materia prima obtenida rica en plomo (A), en zinc (B), y en cobre (C).

En cuanto al material no aprovechable (jales mineros) resultante del proceso de recuperación de los minerales de interés, son vertidos en la presa de jales (figura 2.12). Esta opera desde los años 70's, y actualmente es el depósito de dos minas que están bajo la misma administración de la empresa minera, de las cuales se extraen los mismos minerales de interés y practican las mismas actividades. Tiene un área de afectación superficial de aproximadamente 49,000 m².



Figura 2.12. Presa de jales vista frontal (A), vista lateral (B) y profundidad (C).



CAPÍTULO 3: Metodología

En el desarrollo del presente trabajo se tomaron en cuenta diferentes aspectos para tener una base sólida en el planteamiento de la metodología, como lo son la bibliografía especializada y un diseño estadístico experimental que permita dar fiabilidad a los resultados obtenidos.

Las muestras se obtuvieron de una presa de jales en una mina de Zimapán, Hidalgo, colectadas y enviadas por la minera responsable al Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería. Tales muestras fueron analizadas en el laboratorio de la Unidad de Gestión Ambiental de la Facultad de Química para determinar la concentración de plomo y arsénico, elementos que se encuentran en mayor cantidad y que constituyen un peligro para el ambiente y la salud humana, así mismo se realizaron diversas pruebas físicas y químicas como granulometría, pH, densidad real, y porcentaje de humedad. Estas pruebas ayudan a determinar las características de cómo puede comportarse los jales como material de relleno, refiriéndose a la determinación de granulometría, porcentaje de humedad y densidad real (Niroshan *et al.*, 2017, Fall *et al.*, 2008, Benzaazoua *et al.*, 2004), en cuanto a la determinación de pH se indica la potencialidad de la formación de drenaje ácido de mina, el cual favorece la lixiviación de los EPT (Hernández Ruíz y Padilla, 2010).

Posteriormente se realizó un diseño estadístico experimental, en el cual se compararon tres variantes de S/E para el presente trabajo. La aplicación de esta tecnología de remediación es resultado de la línea de investigación que se deriva de los trabajos de González (2012), Barraza (2015) y de González (2016). La S/E presentada en este trabajo, como se mencionó previamente, tendrá tres variantes reflejadas en la composición de los especímenes, las cuales se presentan a continuación:



- Jal y cemento (JC).
- Jal, cal y cemento (JCC).
- Jal, cemento y zeolita (JCZ).

Después de la elaboración de los especímenes se procedió a la aplicación de diversas pruebas como lo son la compresión mecánica simple (CMS), permanencia en cámara de intemperismo acelerado y pruebas de lixiviación, siguiendo la normatividad correspondiente para tales pruebas, esto para garantizar que en la disposición final no lixivien los elementos potencialmente tóxicos (EPT) que deberán contener y resistir las condiciones a las cuales estarán sometidos dentro del confinamiento.

Los parámetros que se determinaron con estas pruebas fue la resistencia máxima ante la CMS, antes y después de la prueba de intemperismo, y la concentración de los EPT analizados en el lixiviado posterior a la prueba de intemperismo.

Una vez obtenidos los resultados de dichas pruebas, los datos se sometieron a una evaluación mediante un diseño estadístico de experimentos factorial 3x3 de factores fijos completamente al azar, en donde se determinó si existe interacción entre los factores “variante” y “composición” además de marcar las diferencias significativas entre cada uno de los tratamientos.

De manera general en la figura 3.1 se describe la metodología que se siguió en esta investigación, abarcando desde el inicio de esta hasta la entrega del proyecto.

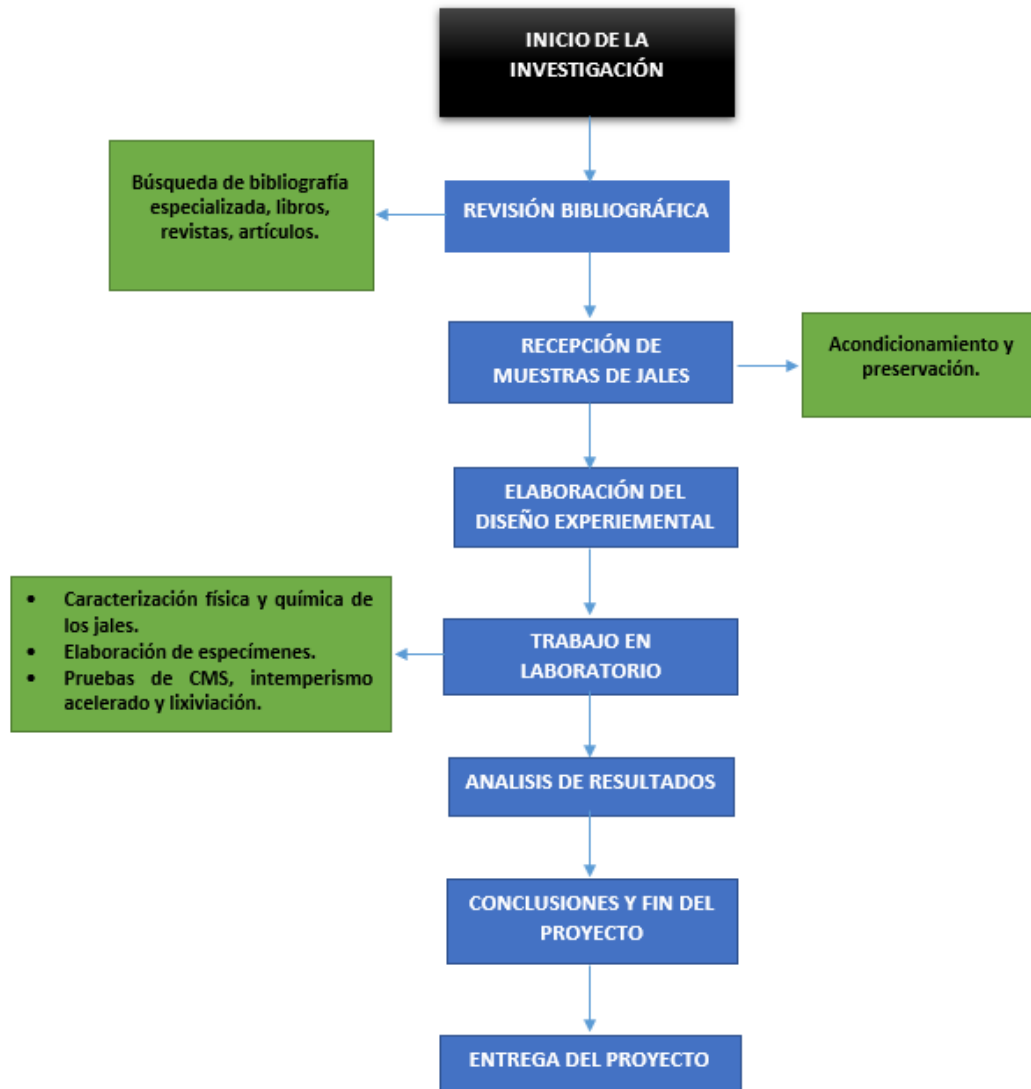


Figura 3.1. Diagrama de metodología general del proyecto de investigación.

3.1 Trabajo de toma de muestra de jales

Las muestras de los residuos mineros a analizar fueron tomadas de una presa de jales del distrito minero de Zimapán en el estado de Hidalgo, mismas que fueron proporcionadas por los responsables de la mina. En la tabla 3.1 se observan los datos generales que se consideraron al momento de realizar el muestreo.



Tabla 3.1. Datos de las muestras de jales de la mina de Zimapan, Hidalgo

MUESTRA	FECHA DE MUESTREO	HORA DE MUESTREO	LUGAR	PESO SECO [kg]
1	6/Feb/16	07:30 a.m.	Cola de la presa nueva	4.005
2		08:00 a.m.	Cabeza lado derecho de la presa nueva	7.525
3		08:13 a.m.	Mitad de la presa nueva	8.230
4		08:22 a.m.	Cabeza lado izquierdo de la presa nueva	7.625
5		08:25 a.m.	Centro de la cabeza de la presa nueva	8.620
6		08:30 a.m.	Borde de la presa nueva	8.635
7		08:46 a.m.	Proceso de presa nueva	4.750

En la figura 3.2 se observan las imágenes de las muestras entregadas para su estudio empacadas en bolsas plásticas debidamente etiquetadas con los datos que se muestran en la tabla 3.1. Las muestras 2, 5 y 6 tenían un aspecto seco con agregados y poca humedad, la 1,3 y 4 estaban mojadas y presentaban plasticidad elevada, mientras que la 7 era la única que tenía agua dentro del recipiente que la contenía, presentando un sobrenadante de 5 cm, estas características de las muestras son debido al punto de muestreo de las cuales fueron tomadas.

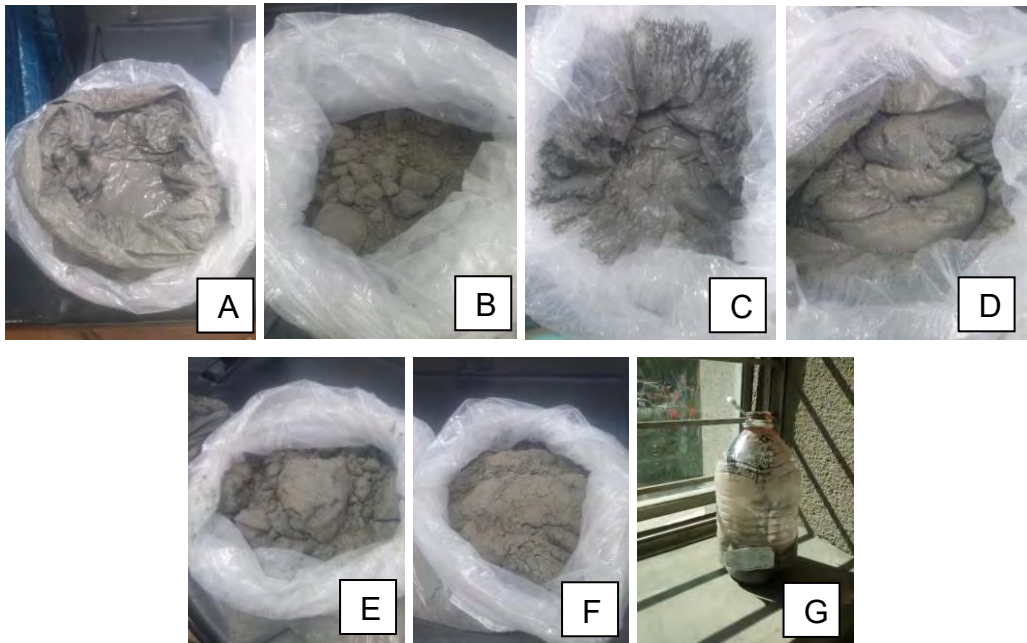


Figura 3.2. Muestras de jales de Zimapán Hidalgo. Muestra 1 (A), muestra 2 (B), muestra 3 (C), muestra 4 (D), muestra 5 (E), muestra 6 (F), muestra 7 (G).

En la figura 3.3 se observa la ubicación geográfica de los puntos de muestreo antes mencionado, la cual indica un acceso difícil por las características del terreno como pendientes (muestra 2, 5, y 6) y zonas inundadas (muestra 1, 3, 4 y 7) donde se encuentra el material a muestrear.



Figura 3.3. Posición geográfica de las muestras.

Las siete muestras se colocaron por separado sobre plásticos negros de dos metros de largo por uno de ancho, posteriormente se dejaron secar a temperatura ambiente durante una semana (figura 3.4). Al término del proceso de secado las muestras presentaban una consistencia totalmente arenosa.



Figura 3.4. Proceso de secado de las muestras. Muestra húmeda (A). Muestra seca (B).

Una vez secas las muestras se guardaron en empaques plásticos para su posterior análisis.

3.2 Caracterización de las muestras de jales

Para llevar a cabo el análisis de la concentración de los EPT se tomaron 100g de cada muestra (peso seco). La cuantificación de Pb y As se realizó de acuerdo con el método USEPA 3050B y haciendo uso de un espectrofotómetro de absorción atómica PEKIN-ELMER 2380, dicho instrumento se muestra en la figura 3.5.



Figura 3.5. Espectrofotómetro de absorción atómica PEKIN-ELMER 2380.

Cabe mencionar que también se hizo la determinación de concentración de estos EPT por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X realizada en el Instituto de Geología en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental dicho equipo se aprecia en la figura 3.6.



Figura 3.6. Equipo de fluorescencia de rayos X.

3.3 Caracterización granulométrica

La caracterización granulométrica de los jales se basó en la norma ASTM-C-136, en esta prueba se separa una muestra del suelo seco de masa conocida, posteriormente se hace pasar a través de tamices en orden creciente (tomando en cuenta el N° de malla) para determinar los tamaños de las partículas de dicha muestra, al finalizar se toma registro de los pesos retenidos en cada uno de los tamices. Para obtener una muestra representativa, tal y como lo indica esta norma, se toma un kilogramo por cada una de las 7 muestras y se aplicó el sistema de cuarteo para tener una muestra homogénea de 200 g para ser tamizada durante 15 minutos. Parte del proceso se muestra en la figura 3.7.



Figura 3.7. Tamizadora Tyler modelo RX-29 (A). Homogeneización de las siete mezclas por el método de cuarteo (B). Muestra compuesta tamizada (C).

3.4 Determinación de humedad

Esta determinación se llevó a cabo de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM -D2216. Para la realización de esta prueba se tomó 50 g de la muestra de jales compuesta y se secó durante 24 horas en una estufa con una temperatura de 40 °C en una cápsula de porcelana que previamente fue sometida a peso constante.

Al término del proceso anterior se dejó enfriar la cápsula con la muestra en un desecador y posteriormente se registró el nuevo peso.

3.5 Determinación de pH

Al igual que en la prueba granulométrica, en la determinación de pH se trabajó con la muestra homogénea, esto con el fin de obtener resultados representativos de toda la presa de jales y no por punto de muestreo, con ello se obtiene la caracterización general del sitio de estudio, así como la aplicación de tratamientos y la viabilidad de estos.

En la determinación de pH para la muestra compuesta de los jales, se consideró lo establecido en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, utilizando un potenciómetro multiparámetro CONDUCTRONIC pH 120 para medir el pH del sobrenadante resultante de esta prueba (figura 3.8).

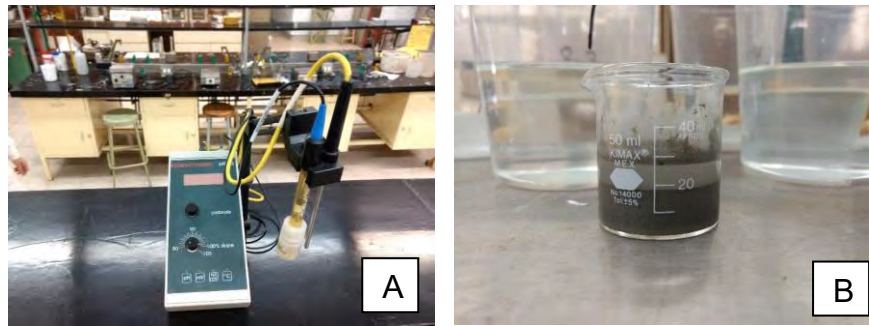


Figura 3.8. Potenciómetro multiparámetro CONDUCTRONIC pH 120 (A). Vaso de p.p. con sobrenadante para la determinación de pH (B).

La calibración de este equipo se realizó de acuerdo a lo establecido con su manual de mantenimiento, sumergiendo el electrodo en la primera solución buffer de pH 7, posteriormente se enjuaga con agua destilada para realizar la siguiente medición con el estándar buffer con pH 4, al término de este paso se enjuaga una vez más el electrodo para poder calibrarlo con el estándar buffer de pH 10.

3.6 Densidad real o de partículas

Henríquez y Cabalceta (2012) determinaron la densidad real de partículas midiendo el volumen desplazado del líquido por una masa conocida de suelo en un frasco volumétrico de volumen conocido. El líquido (o medio acuoso) utilizado para la determinación de la densidad de partículas, puede ser agua o preferiblemente disolventes no polares como el queroseno o el xileno. Debido a que el agua es un disolvente polar, permite la atracción entre partículas de arcilla y las moléculas de agua formando un ordenamiento que tiende a elevar los valores reales de densidad de las partículas hasta en 1%. Pese a estos impedimentos y debido a la facilidad en el manejo, en esta práctica será utilizada el agua como medio.

El proceso y los materiales para la realización de esta prueba se describen con detalle en Henríquez y Cabalceta (2012). En parte del proceso citado se dejó hervir por unos minutos los jales con el objetivo de liberar el aire de las partículas del suelo,

posteriormente se dejó enfriar y se aforaron los matraces para proceder a los cálculos correspondientes (Figura 3.9).

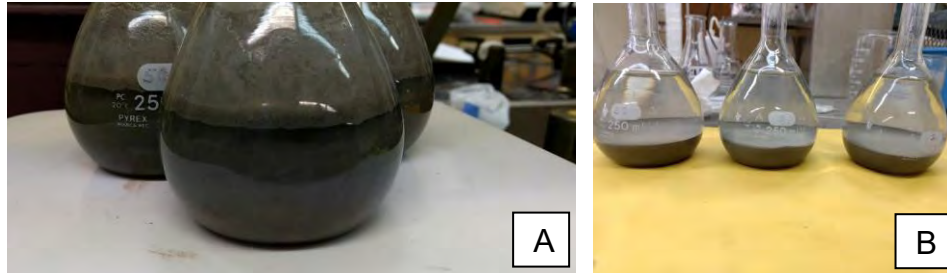


Figura 3.9. Mezcla en proceso de ebullición (A). Determinación de la densidad real de partículas (B).

3.7 Descripción del diseño estadístico de experimentos para la investigación

El diseño experimental establecido para esta investigación fue factorial 3x3 completamente al azar de factores fijos, pues se buscó evaluar el mejor tratamiento para aplicar a los jales y someterlos a pruebas de compresión y de intemperismo acelerado para evaluar el comportamiento de los especímenes al paso del tiempo y determinar las concentraciones de EPT que lixivien, así como evaluar la viabilidad de la propuesta.

3.7.1 Unidad experimental

Estadísticamente una unidad experimental se refiere a la unidad mínima a la cual se le aplica un tratamiento en forma independiente, siendo este caso los especímenes compuestos de jal y demás agregados (los cuales varían en diferentes proporciones que se derivan de los tratamientos JC, JCC y JCZ) que posteriormente solidificados someterlos a las pruebas antes mencionadas.



El número de especímenes (unidades experimentales), se determinó a partir del número de repeticiones que se hicieron por cada variable de respuesta, las cuales serán los resultados de la CMS y las concentraciones de EPT en la prueba de lixiviación posterior a la cámara de intemperismo y que posteriormente se explicarán con detalle; Así mismo, también se tomaron en cuenta las variantes propuestas (JC, JCC y JCZ), de los cuales cada una cuenta con tres composiciones diferentes (estas difieren en cuanto al porcentaje de los agregados de los especímenes) haciendo un total de nueve tratamientos. Dado esto, si se multiplica los nueve tratamientos, por triplicado y por las dos variables de respuesta se obtiene un total de 54 unidades experimentales.

3.7.2 Definición de las variables de respuesta

Las variables de respuesta establecidas para esta experimentación son la resistencia a la CMS, el contenido de plomo y de arsénico determinados en la prueba de lixiviación posterior a la prueba de intemperismo acelerado.

Los resultados generados en la experimentación por cada una de las variables de respuesta se analizaron con la ayuda de un programa de cómputo denominado R, en el cual se realizó el análisis de varianza y se obtuvieron las diferencias estadísticamente significativas en cada tratamiento.

3.7.3 Factores y niveles

En cuanto a los factores y niveles del experimento se determinaron dos factores fijos, la variante (I, II, III) y la composición (A, B, C) con tres niveles cada una.



Tabla 3.2. Factores y niveles del diseño experimental.

FACTOR		NIVELES	
Variante		JC - Jal y cemento (I)	
		JCC - Jal, cemento y cal (II)	
		JCZ - Jal, cemento y zeolita (III)	
Composición	JC	A)	J 70%, C 5%, A 25%
		B)	J 60%, C 15%, A 25%
		C)	J 50%, C 25%, A 25%
	JCC	A)	J 68.75%, C 5%, Ca 1.25%, A 25%
		B)	J 56.25%, C 15%, Ca 3.75%, A 25%
		C)	J 43.75%, C 25%, Ca 6.25%, A 25%
	JCZ	A)	J 65%, C 5%, Z 5%, A 25%
		B)	J 45%, C 15%, Z 15%, A 25%
		C)	J 25%, C 25%, Z 25%, A 25%

Acotaciones: J: jales, C: cemento, Ca: cal, Z: zeolita, A: agua.

3.7.4 Diseño estadístico experimental

El diseño experimental como se mencionó al principio de este apartado se define como factorial 3x3 completamente al azar de factores fijos, y tres variables de respuesta.

El modelo estadístico es:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

i= 1,2,3
j= 1,2,3
k= 1,2,3

Y_{ijk} = Es cualquiera de las tres variables de respuesta resultante para el espécimen k con el nivel i de variante y el nivel j de composición.

μ = Media general, común a todas las unidades experimentales.

τ_i = Efecto del nivel i del factor variante.



β_j = Efecto del nivel j del factor composición.

$(\tau\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción del nivel i del factor variante y del nivel j del factor composición.

ϵ_{ijk} = Error experimental.

Donde: $\epsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$ se supone que el error aleatorio está distribuido en forma normal con media cero y varianza σ^2 .

En donde se plantean las siguientes hipótesis:

1. $H_0: (\tau\beta)_{11} = \dots = (\tau\beta)_{33} = 0 \dots$ No hay interacción entre los factores.
2. $H_{01}: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0 \dots$ No hay efecto del factor variante.
3. $H_{02}: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0 \dots$ No hay efecto del factor composición.

3.8 Elaboración de especímenes

La elaboración de los especímenes se efectuó en el Laboratorio de Materiales ubicado en el edificio principal de la Facultad de Ingeniería en la División de Ingenierías Civil y Geomática en el Departamento de Estructuras siguiendo lo establecido en la Norma Mexicana NMX-C159-ONNCCE-2004, Concreto-Elaboración y Curado de Especímenes en el laboratorio.

La mezcla se realizó manualmente para cada tratamiento haciendo uso de un cucharón hasta lograr una consistencia homogénea, posteriormente se agregó agua y se colocó dentro de moldes plásticos cilíndricos (figura 3.10). El llenado de los moldes fue por capas de igual espesor, cada una de ellas se varilló desde la superior hasta la inmediata inferior distribuyendo golpes uniformemente en toda la sección transversal del molde, después se compactaron golpeando ligeramente con un

mazo de hule el molde para eliminar las oquedades del varillado y las burbujas de aire dentro de la mezcla.



Figura 3.10. Agregados y jales antes de ser mezclados con agua (A). Llenado de moldes cilíndricos (B).

El descimbrado de los especímenes se realizó 24 horas después de su elaboración, cumpliendo con la NMX-C159-ONNCCE-2004 que dispone no hacerlo antes de 20 horas ni después de 48. Posterior al descimbrado todos los especímenes fueron curados durante 28 días a una temperatura de $296\text{ K} \pm 2\text{ K}$ ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$), con una humedad relativa de 95% mínima en la cámara de curado del Laboratorio de Materiales de la División de Ingeniería Civil y Geomática de la Facultad de Ingeniería. El fraguado de los especímenes y el cuarto de curado pueden observarse en la figura 3.11.

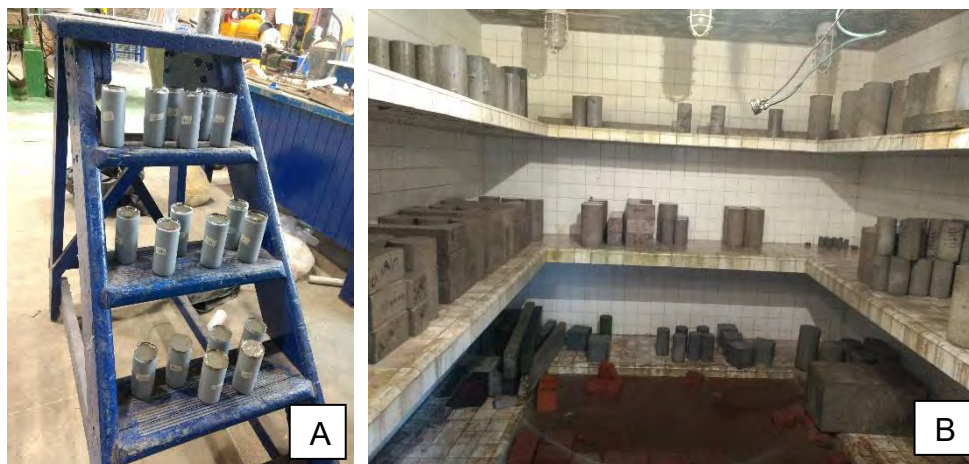


Figura 3.11. Fraguado de especímenes (A). Cuarto de curado (B).



Es importante destacar que el uso destinado de la mezcla será específicamente para relleno de los huecos generados por la minería subterránea y que de acuerdo con diversos estudios tal y como lo cita Niroshan *et al.* (2017), el relleno de pasta cementada presenta concentraciones de materiales sólidos (jales y cemento) de entre el 72% al 85% de la concentración en masa y de ésta última la concentración del cemento cae dentro de un rango típico que varía entre el 3% al 8% de los sólidos.

Por otro lado, las relaciones volumétricas recomendadas entre los componentes de un mortero de relleno se establecen en la Gaceta Oficial del Distrito Federal, en la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, dichos volúmenes se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Relación de materiales de rellenos en elementos estructurales. (Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería).

Tipos	Partes de cemento	Partes de cal	Partes de arena	Grava
Mortero	1	0 a 0.25	2.25 a 3	---
Concreto	1	0 a 0.1	2.25 a 3	1 a 2

*El volumen de la arena se medirá en estado suelto

Debido a que autores como Niroshan *et al.* (2017), Fall *et al.* (2008) y Benzaazoua *et al.*, 2004 reportan la elaboración de la mezcla en relación con la masa y la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería en relación volumétrica, se realizaron pruebas presuntivas para determinar la mejor opción. En este caso se compararon dos mezclas, ambas con 5% en cemento, 70% jales y 25% agua con la diferencia que una fue diseñada con base en peso y la otra en volumen. Es propicio señalar que, al momento de realizar las mezclas, la diseñada en base peso mostró una consistencia más acuosa, mientras que la diseñada en base volumen se pudo observar una consistencia más

pastosa. Al momento de hacer el desembrado, se hizo notorio que la diseñada con base en el peso mostró mucha más fragilidad que la otra en cuestión, tal y como se observa en la figura 3.12.



Figura 3.12. Desembrado de especímenes, base volumen (izquierdo) y base peso (derecha).

Conforme a los resultados de las pruebas presuntivas se procedió a hacer el diseño de mezclas con base en el volumen, sin embargo, no se dejaron de lado las proporciones citadas por Niroshan *et al.* (2017), sirviendo como punto de referencia. El procedimiento general en la elaboración de los especímenes para las dos variantes fue elaborar 2800 mL de mortero por cada uno de sus tratamientos, ya que ésta era la cantidad necesaria para realizar seis especímenes, obteniendo de esta manera triplicado para cada una de las variables de respuesta. En las tablas 3.4, 3.5 y 3.6 se describe con más detalle las proporciones usadas para cada una de las variantes y composiciones empleadas en la elaboración de los especímenes.

Tabla 3.4. Composición en porcentaje de especímenes JC.

Variante I	Composición	Jales	Cemento	Agua	Vol. total de la mezcla (cm ³)
Jales y cemento (JC)	A	70	5	25	2800
	B	60	15	25	
	C	50	25	25	



Tabla 3.5. Composición en porcentaje de especímenes JCC.

Variante II	Composición	Jales	Cemento	Cal	Agua	Vol. total de la mezcla (cm ³)
Jales, cal y cemento (JCC)	A	68.75	5	1.25	25	2800
	B	56.25	15	3.75	25	
	C	43.75	25	6.25	25	

Tabla 3.6. Composición en porcentaje de especímenes JCZ.

Variante III	Composición	Jales	Cemento	Zeolita	Agua	Vol. total de la mezcla (cm ³)
Jales, cemento y zeolita (JCZ)	A	65	5	5	25	2800
	B	45	15	15	25	
	C	25	25	25	25	

3.9 Prueba de fluidez en la mezcla

También se determinó la fluidez de la mezcla mediante el proceso descrito por la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1967 en su “Instructivo para concreto”, pues es una característica que sirve para calificar la manejabilidad, la cual consiste en conocer la dificultad o facilidad que presenta dicha mezcla al deslizamiento sobre una superficie, originada por movimientos iguales y consecutivos que obligan a la mezcla a extenderse. El material utilizado para esta prueba fue:

- Mesa de fluidez con platillo de bronce de 255 mm de diámetro con altura de caída de 12 mm.
- Cono truncado de 100 mm diámetro de base inferior y de 70 mm de diámetro en base superior.
- Pisón de grafeno.

Todo este material puede apreciarse con más detalle en la figura 3.13.



Figura 3.13. Mesa de fluidez con platillo de bronce y cono trunco.

Al término de la elaboración de la mezcla, se colocó en el centro del platillo de bronce el cono trunco previamente humedecido, el cual se llenó con mezcla y se introdujo un pisón 20 veces consecutivas para asegurar la eliminación de huecos y burbujas de aire, después se enrazó con la cuchara y se limpió la mezcla que pudiese haber caído al platillo de bronce. El molde se retiró verticalmente y de manera continua, en seguida se efectuaron 25 golpes mediante la manivela tal y como lo marca la NMX - C - 486 - ONNCCE - 2014. En la figura 3.14 se observa la apariencia del mortero tras los 25 golpes de caída y el momento justo en que se debe hacer las mediciones del diámetro.



Figura 3.14. Prueba de fluidez en mortero de relleno.



3.10 Prueba de compresión simple

Una buena comprensión de las propiedades mecánicas es clave para evaluar la estabilidad mecánica y el rendimiento de cualquier estructura de relleno de pasta cementada. El método más común, económico y directo para determinar la resistencia mecánica y comportamiento de tensión de los materiales de relleno es la prueba de compresión mecánica simple o uniáxial (Yilmaz y Fall 2017).

Una vez realizados los especímenes, y después de 28 días de curado, se realizaron las pruebas de compresión, estas se llevaron a cabo en la División de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería en el Laboratorio de Pruebas Mecánicas, utilizando una prensa mecánica marca Instron con capacidad de carga de hasta 15,000 kg. Se siguió con lo establecido en la norma ASTM C39, "Método estándar de prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto". Los especímenes fueron acondicionados con una esmeriladora marca SKILL modelo 9002 de 4 1/2" respetando las dimensiones 2:1 (altura-diámetro) como lo marca dicha norma. Al inicio de la CMS los especímenes se colocaron en la placa inferior de la prensa, con sumo cuidado de alinear el cabezal superior a éstos con ayuda de una serie de círculos concéntricos de distintos diámetros ubicados en el cabezal, posteriormente se aplicó la carga uniformemente hasta el fallo del espécimen. Así mismo se repitió este proceso para los especímenes que se destinaron a la prueba de intemperismo acelerado, con el fin de evaluar su comportamiento tras dicha prueba. En la imagen 3.15 se observa parte del proceso descrito.

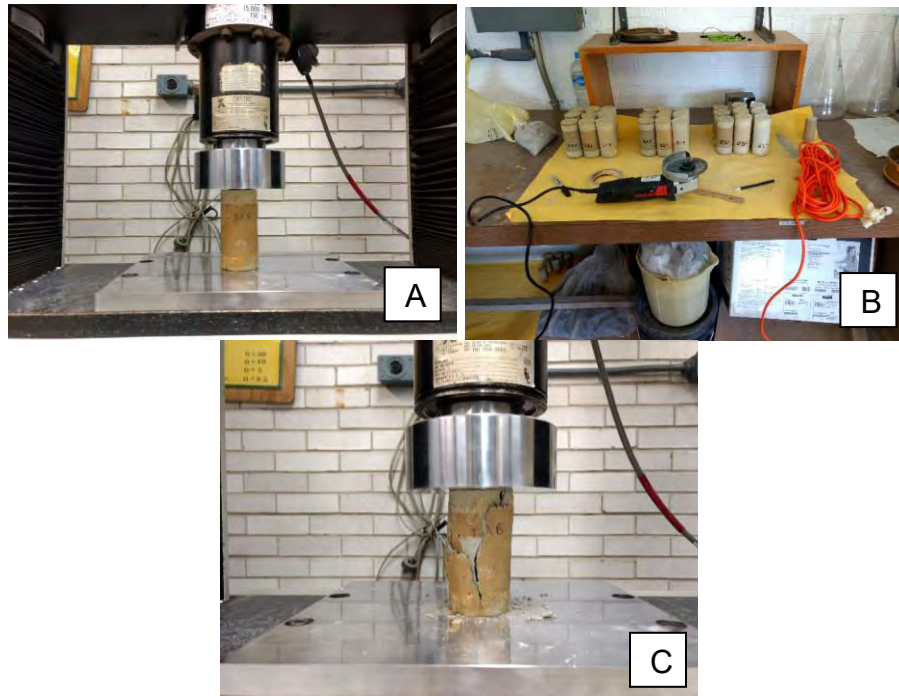


Figura 3.15. Prensa mecánica marca Instron (A). Acondicionamiento de especímenes (B). Fallo del espécimen bajo CMS (C).

3.11 Prueba de intemperismo acelerado

Esta prueba se realizó a los especímenes después del curado y se hizo en la Facultad de Ingeniería en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM) en el Laboratorio de Corrosión del Departamento de Mecánica. La prueba está avalada por la ISO 9223 para determinar el envejecimiento de los especímenes mediante variaciones en los ciclos de humedad y temperatura. Para ello se hizo uso de una cámara atmosférica de ensayos de envejecimiento, o también conocida como cámara de intemperismo acelerado (figura 3.16), donde se simulaban condiciones similares al interior de una mina, tomando en consideración variaciones de humedad en un rango del 80% al 90% (González, 2016; Fall *et al.* 2008) y una temperatura de 5 a 40 °C. Los especímenes se expusieron a ciclos con duración de 15 min (representando un día), mediante los

cuales se efectuaban las variaciones de temperatura y humedad. Estos ciclos se repitieron hasta alcanzar la simulación de un año de intemperismo.



Figura 3.16. Cámara de intemperismo acelerado (A). Especímenes en cámara de intemperismo acelerado (B).

3.12 Prueba de lixiviación

Para esta prueba se tomaron los especímenes que se sometieron a la prueba de intemperismo acelerado y a la prueba de compresión mecánica simple, de cada uno de éstos se tomó una pequeña muestra triturada tomando en especial consideración la parte superficial de los especímenes, el tamaño de partícula fue de $9.8 \pm 2 \text{mm}$ (NOM-053-SEMARNAT-1993), después se sometieron a contacto con agua en equilibrio con CO_2 con un pH de 5.5 (NOM-141-SEMARNAT-SSA- 2004), y un tiempo de contacto de cuatro horas (Benzaazoua et al 2008 y Cruz et al 2001). Posteriormente al lixiviado obtenido se le midió el pH. Es menester aclarar que se tomó ese diámetro de partícula y ese tiempo de contacto debido a que lo evaluado en este caso es el jal bajo un tratamiento de S/E que sí actúa como un sólido. En la figura 3.17 se ilustra parte del proceso donde las partículas de los especímenes se encuentran bajo lixiviación.



Figura 3.17. Prueba de lixiviación en partículas de especímenes posterior al intemperismo acelerado.



CAPÍTULO 4: Resultados y su evaluación

4.1 Resultados de concentración de EPT en jales

En la tabla 4.1 se pueden observar los resultados obtenidos por parte del Laboratorio de Química Ambiental, estos fueron realizados por triplicado por cada punto de muestreo de la presa de jales, mostrando concentraciones diferentes entre sí. También se aprecian los resultados obtenidos en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental, los cuales muestran similitud significativa en comparación con los mencionados anteriormente.

Tabla 4.1. Concentraciones en ppm de EPT en las muestras de jales.

Muestra	Absorción Atómica		Fluorescencia de RX	
	(Lab. de Química Ambiental)		(Lab. de Geoquímica Ambiental)	
	Pb (ppm)	As (ppm)	Pb (ppm)	As (ppm)
1	834.55	3 016.48	922.74	4 876.1
2	882.57	4 026.49	868.22	4 971.32
3	577.9	4 074.04	554.15	5 677.73
4	629.14	3 516.24	613.83	4 193.92
5	587.37	4 808.55	752.44	7 238.02
6	1 256.65	5 469.26	984.71	5 489.15
7	833.27	8 744.53	817.13	8 647.07
Promedio	800.20	4 807.94	787.60	5 870.47
Desv. Estándar	238.53	1 913.16	158.33	1 547.60

En la tabla anterior se aprecia que las muestras 1, 2, 6 y 7 rebasan el LMP para uso de suelo industrial (800 mg/kg) establecido en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 en cuanto a concentraciones de plomo se refiere, así mismo el arsénico sobrepasa su respectivo LMP (260 mg/kg) en todas las muestras. Para los LMP establecidos dentro de la misma norma para uso de suelo agrícola establece para arsénico 22 mg/kg y para plomo 400 mg/kg de los cuales todas las muestras rebasan estos límites.



4.2 Resultados del análisis granulométrico de los jales

Los datos obtenidos en la prueba granulométrica se muestran en la tabla 4.2, observándose que la mayor parte de la muestra queda retenida entre las mallas 60, 140 y entre la 140, 200.

Tabla 4.2. Distribución granulométrica de los jales.

MALLA	APERTURA (mm)	PESO RETENIDO	% SEPARADO	% ACUMULADO
20	0.85	0.08	0.04	0.04
40	0.425	0.90	0.45	0.49
60	0.25	7.94	3.97	4.46
140	0.104	77.12	38.56	43.02
200	0.075	66.99	33.49	76.51
>200	<0.075	46.42	23.21	99.72 (charola)
Σ	---	199.45	99.72	124.52

Con base en los datos de la tabla anterior se determinó el módulo de finura, el cual indica la clasificación de partícula a la que pertenece la muestra y se calcula mediante la ecuación 4.1, así mismo también se muestra la curva granulométrica correspondiente en la figura 4.1.

$$M.F. = (\sum \%ac) / 100 \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

M.F. = Módulo de finura.

Σ %ac = Sumatoria del porcentaje acumulado.

$$M.F. = (124.5215) / 100 = 1.2452$$

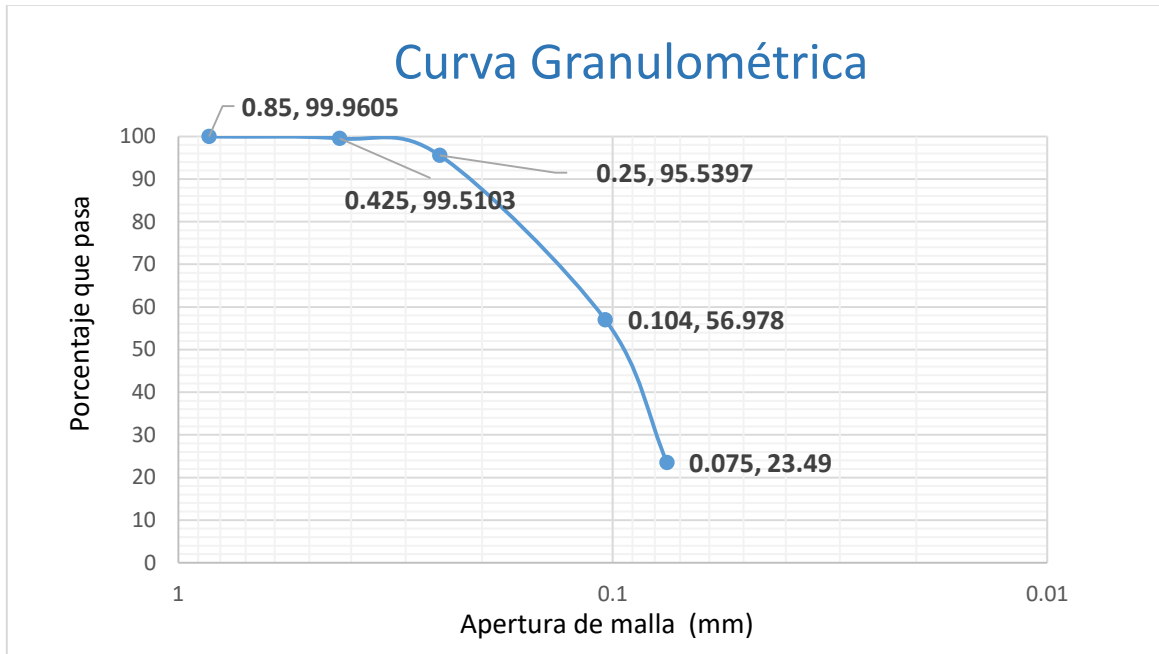


Figura 4.1. Curva granulométrica.

Una vez obtenido el módulo de finura se comparó con la tabla 4.3, donde se establecen los rangos pertenecientes a determinado diámetro de partícula, concluyendo que los jales en este estudio se encuentran en la "clase de arena muy fina".

Tabla 4.3. Clasificación de arena dependiendo del módulo de finura (Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1967).

CLASE	M.F.
Arena Gruesa	2.5 - 3.5
Arena Fina	1.5 - 2.5
Arena muy Fina	0.5 - 1.5



4.3 Determinación del porcentaje de humedad

Después de retirar la muestra de jales compuesta de la estufa, se dejó enfriar en un desecador para poder determinar su peso en seco. Los datos obtenidos de antes y después del proceso de secado en la estufa se muestran en la tabla 4.4, dichos datos sustituidos en la ecuación 4.2 permiten obtener el porcentaje de humedad total presente en la muestra compuesta de jales.

Tabla 4.4. Pesos obtenidos en la determinación de humedad de la prueba compuesta.

ESTADO	PESO
Húmedo	50.00 g
Seco	49.82 g

$$PHT = [(M1 - M2) / M2] X 100 \quad Ec. 4.2$$

Donde:

PHT: Porcentaje de humedad total.

M1: Peso del suelo húmedo.

M2: Peso del suelo seco.

$$PHT = [(50.0050 - 49.8184) / 49.8184] X 100$$

$$PHT = 0.3746 \% \text{ de humedad}$$

En esta prueba se demuestra que los jales tienen 0.3746 % de humedad, e indica que en condiciones ambientales estándar su capacidad de retención de humedad es casi despreciable.



4.4 Determinación de la densidad real de los Jales de Zimapán Hidalgo

La tabla 4.5 muestra con detalle los datos obtenidos de la prueba de densidad real de partículas, es pertinente aclarar que la misma se desarrolla siguiendo el orden de la columna que lleva el encabezado "Paso". Así mismo es conveniente señalar que, en la columna de "Parámetros", en algunas de sus filas, se muestra entre paréntesis las operaciones a seguir con los valores obtenidos en pasos previos.

En el paso 14 se muestran las operaciones y los resultados por triplicado que presentaron los jales respecto a la densidad real, teniendo que en promedio estos presentan una densidad real de 3.2173 g/cm^3 , tal resultado es demasiado elevado al momento de compararlo con el de los minerales primarios más comunes en el suelo, pues de acuerdo con Henríquez y Cabalceta (2012) un valor promedio de densidad de partículas en el suelo es de $2,650 \text{ kg/m}^3$ (Ortoclusas $2,500\text{-}2,600$; Cuarzo $2,500\text{-}2,800$; Plagioclasas $2,600\text{-}2,760 \text{ kg/cm}^3$ etc.). Este resultado se debe principalmente a la finura que presentan las partículas de los jales, ya que como se trató en capítulos anteriores, el proceso de extracción de minerales implica la molienda de la mena en un diámetro de partícula en específico.



Tabla 4.5. Datos para la determinación de densidad real (Henríquez y Cabalceta. 2012).

Paso	Parámetros	Matraz 1	Matraz 2	Matraz 3
1	Masa del balón seco (g)	93.87	99.56	94.64
2	Masa del balón + agua al calibrar (g)	342	348	344
3	Masa del agua al calibrar (g)	248.13	248.44	249.36
4	Temp. del agua al calibrar (°C)	23	23	23
5	Densidad del agua al calibrar	0.99	0.99	0.99
6	Volumen del balón (3/5) (mL)	248.73	249.05	249.97
7	Masa del balón seco + suelo (g)	193.87	199.56	194.64
8	Masa del suelo (7-1) (g)	99.99	99.99	99.99
9	Masa del balón + suelo + agua en la lectura (g)	411.6	417.35	412.3
10	Temp. del suelo + agua en lectura (°C)	21	21	21
11	Densidad del agua en la lectura	0.99	0.99	0.99
12	Volumen del agua (9-7/11)	218.16	218.22	218.10
13	Volumen del suelo (6-12)	30.57	30.83	31.88
14	Densidad de partículas (8/13)	3.27	3.24	3.14



4.5 Determinación de fluidez de morteros

En la tabla 4.6 se muestran los resultados tras la prueba de fluidez por cada uno de los tratamientos, así mismo, como observaciones de comportamiento que se presentaron en dicha prueba.

Tabla 4.6. Diámetros de los morteros por cada tratamiento.

Numero	Tratamiento	Medición 1 (cm)	Medición 2 (cm)	Promedio de fluidez (cm)	Observaciones
1	IA	22.5	22.5	22.5	---
2	IB	21.5	21	21.3	---
3	IC	23	23	23.16	---
4	IIA	24	24	24.1	---
5	IIB	25	25	24.76	---
6	IIC	22	22	21.9	---
7	IIIA	25	25	25.1	---
8	IIIB	25	25	25.1	---
9	IIIC	25.5	25.5	25.5	*6 caídas = 21 cm caídas = disco lleno *15

*En el tratamiento IIIC se observó que a las 6 caídas en la meza de fluidez la mezcla presentaba un diámetro de 21 cm, y a los 15 golpes abarcaba por completo el disco de la mesa de sacudidas.

Con los datos mostrados en la tabla 4.6 y con el diámetro interno del cono trunco usado en esta prueba, se pueden despejar las variables en la siguiente fórmula y obtener el valor de porcentaje de fluidez, los cuales se muestran en la tabla 4.7.

$$\text{Porcentaje de fluidez} = [(d/D) \times 100] - 100$$

Donde:

d = Promedio en mm del incremento de los diámetros a 90° sobre la superficie del mortero después de la prueba.

D = Diámetro interior de la base inferior del molde cónico en mm.



Tabla 4.7. Fluidez obtenida por cada uno de los tratamientos propuestos.

Tratamiento	Fluidez
IA	125%
IB	112.5%
IC	130%
IIA	140%
IIB	150%
IIC	120%
IIIA	150%
IIIB	150%
IIIC	155%

De acuerdo con la norma NMX - C - 486 - ONNCCE – 2014, el valor de fluidez para mortero de relleno medido en el laboratorio debe ser de 125% a 130%. Como se puede observar, los tratamientos que se encuentran dentro del rango aceptado es el IA y el IC. Cabe mencionar que esta prueba no es determinante para los objetivos de este estudio, pues ésta solo refleja la factibilidad de ser bombeada y manejada por maquinaria para el momento de su deposición en los huecos mineros y servir como referencia para la caracterización de la mezcla por tratamiento.

4.6 Determinación de pH en jales

Los resultados de pH de los jales se muestran por triplicado en la tabla 4.8, de igual forma se muestra la temperatura a la cual fue realizada la medición. En promedio se obtiene un pH de los jales de 7.54.



Tabla 4.8. Resultados de pH de los jales

Medición	pH	Temperatura
1	7.56	21.3
2	7.54	21.3
3	7.52	21.3

Este resultado se puede comparar con el estudio realizado por Hernández Ruíz y Padilla (2010) en el cual estudiaron jales de coloración roja y gris en el área de estudio de "San Miguel Viejo" en Zimapán Hidalgo. Haciendo énfasis en los de color gris (por la semejanza con los del presente estudio) se muestra que el resultado obtenido fue un pH de 7.58, el cual refleja una similitud muy alta en contraste con los reportados en la tabla 4.8.

4.7 Pruebas de compresión a especímenes antes y después de la prueba de intemperismo acelerado

Los resultados obtenidos en la prueba de compresión mecánica simple se hicieron por triplicado antes y después a la prueba de intemperismo acelerado, cuyos promedios de respuesta a la carga máxima soportada por tratamiento se muestran en la figura 4.2 en unidades de MPa.

Se observa que las composiciones con menos cemento (las "A") resisten un esfuerzo menor en comparación con las otras ("B" y "C"), esto implica que a menor contenido de cemento se tiene baja resistencia a la compresión mecánica simple.

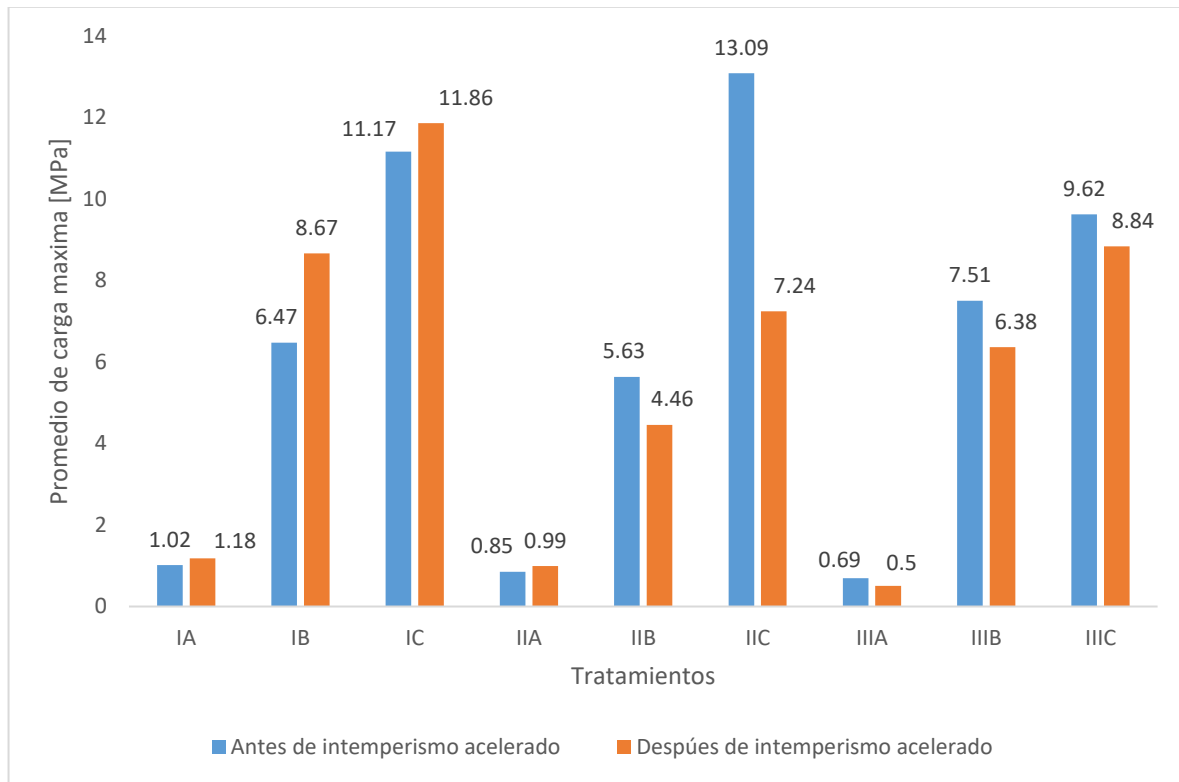


Figura 4.2. Resultados de CMS en especímenes antes y después de la prueba de intemperismo acelerado.

Como se observa en la figura 4.2 los tratamientos IA, IB, IC, y IIA aumentaron su resistencia incluso después de la prueba de intemperismo acelerado, mientras que el resto de los tratamientos mostraron una disminución después de la misma, esto se debe que al variar algunos de los agregados, las mezclas eran más acuosas (viéndose reflejado en la fluidez), y por lo tanto que en el proceso de curado los especímenes formaron una mayor cantidad de poros, que en sinergia con el intemperismo acelerado, provocaron una baja resistencia a la CMS (Yilmaz y Fall. 2017).

Yilmaz y Fall (2017) determinan que el relleno de pasta cementado utilizado para el llenado de vacío, requiere usualmente una resistencia a la compresión muy baja (por ejemplo, 0.15 MPa a 0.3 MPa), mientras que el relleno de soporte



autónomo o de techo exige una resistencia a la compresión alta, entre 1 y 4 MPa (Fall et al., 2005).

Como se observa en la figura anterior básicamente todos los rellenos son aptos para el relleno de vacíos, mientras que en caso de darles un uso de soporte autónomo los únicos tratamientos que no cumplen con este requisito son el IIA y el IIIA.

En otro estudio Fall et al. (2008) determinan que un rango deseable para la resistencia a la compresión mecánica simple, el cual oscila entre 0.7 MPa - 1 MPa, que al compararlo con el de Yilmaz y Fall (2017) se infiere que este rango es también aceptado para uso de relleno. Comparando este último rango con los datos obtenidos, se aprecia que todos tienen un esfuerzo mayor al límite inferior establecido, a excepción del tratamiento IIIA.

También es necesario hacer notar que algunos tratamientos incrementaron su resistencia a la compresión mecánica después de someterlos a la prueba de intemperismo acelerado, a excepción de los tratamientos IIB, IIC, IIIA, IIIB, IIIC.

Al calcular con estos datos un análisis de varianza con el programa "R", se obtiene la tabla 4.9:

Tabla 4.9. Análisis de varianza de la CMS posterior al intemperismo acelerado.

Response: y

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Variante	2	18.47	9.233	7.5455	0.004169 **
Composición	2	331.67	165.837	135.5354	1.407e-11 ***
Variante : Composición	4	13.61	3.404	2.7817	0.058347.
Residuals	18	22.02	1.224		

Al tomar un valor de significancia de 0.05 y obtener un p-value de 0.004169 para "variante", de 1.407e-11 para "composición", y de 0.058347 para "variante: composición", no se rechaza la hipótesis H0, la cual indica que no existe interacción



entre los factores de "variante" y "composición". Por otra parte, H01 y H02, se rechazan, es decir existe efecto de los factores por separado afectando la variable de respuesta. A continuación, se muestra la tabla 4.10 donde se aprecia la comparación por el método de Tukey entre las medias de los niveles de los factores.

Tabla 4.10. Comparación múltiple Tukey de medias de los factores "variante" y "composición" con variable de respuesta CMS.

\$Vari ante

	di ff	l wr	upr	p adj
II - I	-1.76951324	-3.100325	-0.4387013	0.0086424
III - I	-1.73864100	-3.069453	-0.4078290	0.0098189
III - II	0.03087224	-1.299940	1.3616842	0.9980695

\$Composi ci ón

	di ff	l wr	upr	p adj
B-A	5.532247	4.201435	6.863059	0.00e+00
C-A	8.451609	7.120797	9.782421	0.00e+00
C-B	2.919362	1.588550	4.250174	7.36e-05

Al tomar un valor de significancia del 0.05 se observa que para el factor "variante" existe diferencia significativa en "I" ante "I y II", y "I y III", mientras que "II y III" son iguales estadísticamente hablando, es decir que al comparar los pares de medias entre las variantes se tiene que "I" es mayor que "II" y "III", por tanto, es la mejor variante en cuanto a capacidad de carga se refiere.

De igual forma para el factor "composición" se toma el mismo valor de significancia, mostrándose que todas las composiciones son diferentes entre sí, por lo cual se tomo en cuenta las diferencias entre pares de medias, mostrando que la composición "C" es la que mayor resistencia a la CMS presenta, seguida de la composición "B" y demostrando que "A" es la composición que menos capacidad de carga presenta.



4.8 Prueba de lixiviación

Los resultados derivados de la prueba de lixiviación posterior a la prueba de intemperismo acelerado, se aprecian de manera gráfica en la figura 4.3 presentando solo la concentración de arsénico, ya que en cuanto al plomo no se encontraron concentraciones por encima del límite mínimo de detección del equipo de absorción atómica usada para dicha determinación.

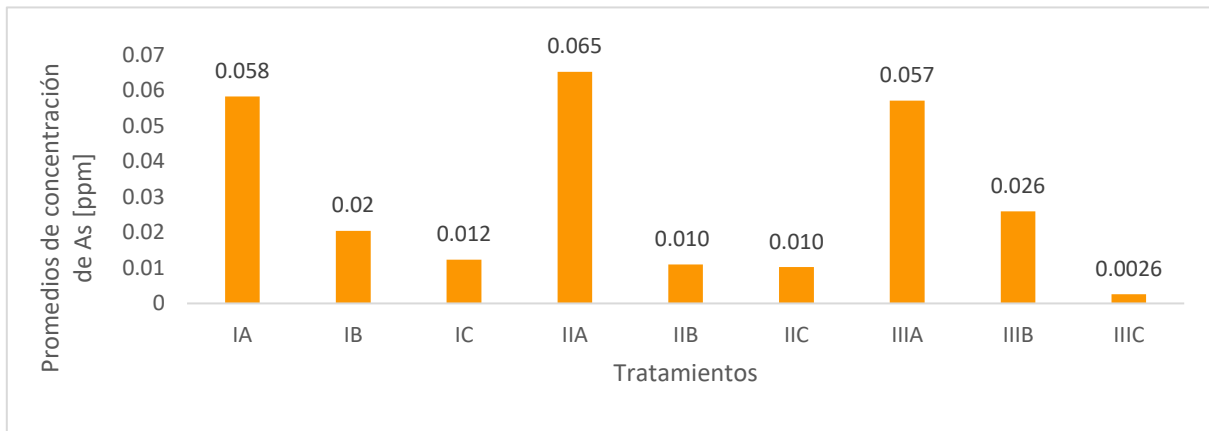


Figura 4.3. Resultados de la concentración de As presente en el lixiviado después de la prueba de intemperismo acelerado.

Al comparar los resultados obtenidos con la Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009 en cuanto a los LMP para constituyentes tóxicos se tiene que para arsénico existe un LMP de 5 mg/L. Como se observa en la figura 4.3 se muestra que ninguno de los tratamientos rebasa dicha concentración. Es destacable que en el tratamiento IIIC se presenta la mayor absorción de arsénico, pues en dicho tratamiento se presenta la mayor cantidad de zeolita en su composición, ya que en estudios como el de Mejía *et al.* (2009) se demuestra la efectividad de éste aluminosilicato en el tratamiento de aguas con contenido de arsénico.

Al igual que en las pruebas de compresión mecánica, se aprecia que los mejores resultados se presentan en los tratamientos donde la concentración de cemento es alta (tratamientos IC, IIC y IIIC). Esto se debe a que cuanto menor sea la cantidad de cemento, se forman menos hidratos de éste, derivando en una menor consolidación entre las partículas de los jales, esto se muestra en la figura 4.4 donde

se observa que al término del proceso de filtración para obtener el lixiviado, en los filtros donde había tratamientos con una menor cantidad de cemento se presentó una mayor retención de partículas.

No obstante, al analizar los datos mediante el diseño experimental factorial 3x3 completamente al azar con el programa "R", se obtiene en primera instancia la tabla 4.11 de análisis de varianza.

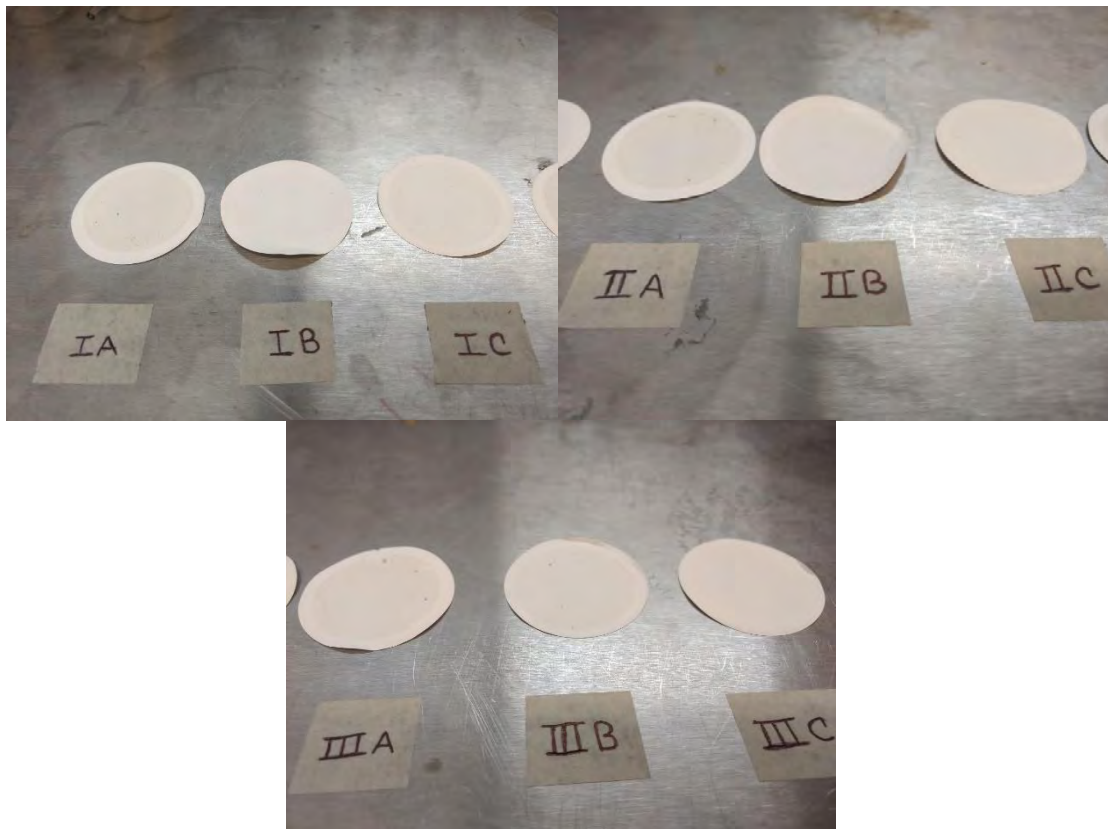


Figura 4.4. Comparación de filtros usados en prueba de lixiviación entre tratamientos.



Tabla 4.11. Análisis de varianza de concentración de As en lixiviado posterior al intemperismo acelerado.

Response: y1

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Vari ante1	2	0.0000162	0.0000081	0.0327	0.9679
Composi ci on1	2	0.0134219	0.0067109	27.1688	3.657e-06 ***
Vari ante1: Composi ci on1	4	0.0005883	0.0001471	0.5955	0.6705
Resi dual s	18	0.0044462	0.0002470		

Al tomar un valor de significancia de 0.05 y obteniendo un *p-value* de 3.657e-06 para "composición", de 0.9679 para "variante" y de 0.6705 para "Variante: Composición", no se rechazan las hipótesis H0 y H01, las cuales indican que no existe interacción entre los factores de "variante" y "composición"; además, de no existir efecto del factor "variante". Por otra parte, se rechaza H02, la cual nos indica que sí existe efecto del factor "composición" mostrando diferencia significativa para esta prueba.

La tabla 4.12 muestra la comparación por el método Tukey del factor "composición".

Tabla 4.12. Comparación múltiple Tukey de medias del factor "composición" con variable de respuesta la concentración de As en lixiviado.

\$Composi ci on1

	di ff	l wr	upr	p adj
B-A	-0.04111111	-0.06001966	-0.022202565	0.0000816
C-A	-0.05169048	-0.07059902	-0.032781930	0.0000047
C-B	-0.01057937	-0.02948791	0.008329181	0.3481340

Para el factor "composición" se toma el mismo valor de significancia, mostrando que las composiciones "C" y "B" son estadísticamente similares y que existe una diferencia significativa al usar la composición "A", ya que al comparar las diferencias entre los pares de medias se tiene que "A" es mayor que "B" y "C", es decir que en ésta composición se presenta mayor concentración de arsénico en el lixiviado.



Estos resultados se pueden contrastar con los resultados obtenidos por García en 2018, donde se realizaron pruebas de lixiviación en los jales de esta misma zona de estudio, así como en los sitios de muestreo, siguiendo la metodología establecida en la NOM-141-SEMARNAT-SSA- 2004. Estos resultados se pueden apreciar en la figura 4.5.

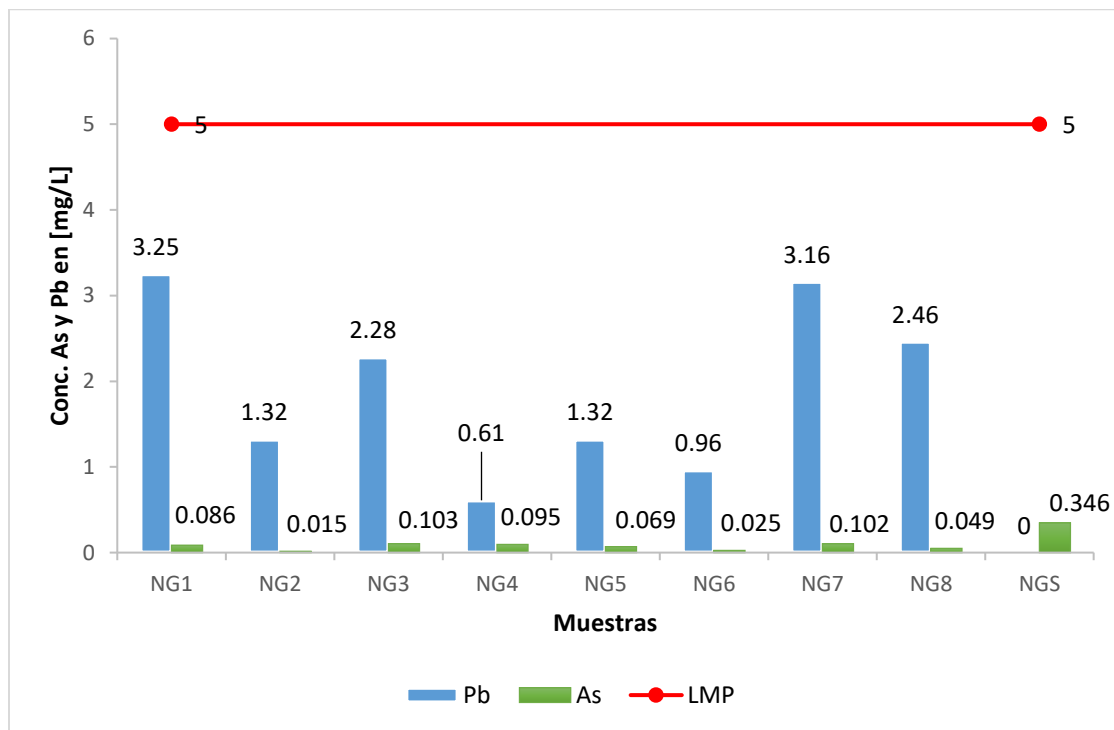


Figura 4.5. Concentraciones de EPT presentes en el lixiviado resultante de los jales sin tratamiento. (García, 2018).

La figura 4.5 demuestra que mediante dicho método de extracción las concentraciones de los jales sin ningún tipo de tratamiento no rebasan el LMP. Sin embargo, al tratarse de un relleno se deben cumplir parámetros de carga dependiendo al uso o disposición final que se desea darle. Por otra parte, se demuestra que la aplicación de tratamientos a los jales reduce de manera significativa la concentración de plomo y arsénico.



Los resultados de pH medidos en el lixiviado generado del contacto entre las partículas de los especímenes con el agua en equilibrio con CO₂, se presentan en la tabla 4.13.

Tabla 4.13. Promedio de pH por tratamiento en lixiviado

TRATAMIENTO	pH
IA	9.2
IB	10.9
IC	11.34
IIA	9.69
IIB	11.4
IIC	11.33
IIIA	9.31
IIIB	11.03
IIIC	11.17

Al comparar los resultados de la tabla anterior con el rango permisible de pH (5 a 10 unidades) para la descarga de aguas residuales a aguas y bienes nacionales establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, se tiene que solo los tratamientos IA, IIA Y IIIA se encuentran dentro de dicho rango. Esto denota que la presencia de cemento incrementa el valor de pH, tomando en cuenta que al mismo tiempo actúa de manera sinérgica con el contenido de carbonatos presente en los jales, los cuales de igual forma ayudan a tener una capacidad amortiguadora ante la acidificación.



CAPITULO 5: Conclusiones

La investigación referente a la minería en México, legislación nacional y técnicas de estabilización relacionada a las zonas mineras se realizó a través de una revisión bibliográfica en medios impresos y electrónicos, encontrándose que México presenta varias similitudes en la gestión de este tipo de residuos comparándolo en el contexto internacional, abarcando aspectos como la detallada disposición de los jales, hasta el hecho de presentar un plan de gestión y monitoreo del sitio posterior al cierre o abandono de la mina. En cuanto a las técnicas de estabilización, se corrobora que la S/E es la mejor opción para el confinamiento de los jales, tomando en cuenta que se solucionan problemas como la subsidencia por huecos, la dispersión de los jales en el ambiente, la pérdida de cobertura vegetal en la superficie, además del posible aprovechamiento de los depósitos minerales de interés económico adjunto al relleno.

La composición física y química de los jales se determinó a través de diversas técnicas analíticas permitiendo conocer la concentración de EPT que podrían contener, como así mismo evaluar su comportamiento como material de relleno de mina. Dentro de los resultados obtenidos el módulo de finura indica que los jales tienen una categoría de “arena muy fina”, esto, en conjunto con la densidad real de partículas se refleja en una demanda mayor en la cantidad de cemento para lograr una alta resistencia a la CMS. En cuanto al porcentaje de humedad retenido en los jales indica que éstos tienden a absorberla de manera despreciable siempre y cuando se encuentren dentro de condiciones ambientales estándar. Por otra parte, la caracterización química demuestra que el 57% de las muestras rebasan el LMP establecido en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 en cuanto a plomo se refiere, mientras que para arsénico todas las muestras sobrepasan su respectivo LMP. Dentro de la misma caracterización química también se determinó el pH de los jales, el cual en promedio es de 7.54, este resultado es levemente alcalino y se debe principalmente al contenido de carbonatos los cuales ayudan a tener una capacidad amortiguadora ante la acidificación, indicando en primera instancia que estos jales no son potenciales generadores de drenaje ácido de mina (DAM).



La proporción entre agregados de la S/E más eficaz para los jales se determinó probando diferentes variantes y composiciones de mezcla para formar especímenes sometidos a CMS (antes y después de un proceso de intemperismo acelerado) y pruebas de lixiviación, (posterior a la prueba de envejecimiento). Se concluye que sin importar las proporciones entre los tratamientos disminuyen las concentraciones de plomo de manera significativa, mientras que el arsénico sigue presente en el lixiviado.

De igual forma el diseño estadístico de experimentos se elaboró considerando las diferentes variantes y composiciones empleadas en la fabricación de especímenes, considerando un diseño factorial 3x3 completamente al azar de factores fijos, el cual marcó diferencias significativas entre los tratamientos (IA, IIA, IIIA, IB, IIB, IIIB, IC, IIC, y IIIC), además de la existencia de la interacción entre los factores. Los resultados obtenidos demuestran la no interacción entre los dos factores (variante y composición). En la prueba de CMS se tiene que en el factor "composición", todos los niveles se muestran estadísticamente diferentes entre sí, pero tomando en cuenta las diferencias entre pares de medias, se muestra que la composición "C" es la que mayor resistencia a la CMS tiene, seguida de la composición "B" y "A" siendo esta última la que menos capacidad de carga presenta. En cuanto al factor "variante" la CMS ostenta diferencia significativa al hacer uso de "I" (siendo "II" y "III" estadísticamente similares) ya que ésta manifiesta los mejores resultados de capacidad carga. Para el caso de la prueba de lixiviación se tiene que para el factor "variante" todos sus niveles son estadísticamente similares, es decir no hay diferencia al hacer uso entre alguno de ellos, mientras que para el factor "composición" se tiene que las composiciones "C" y "B" son estadísticamente similares y que existe una diferencia significativa al usar la composición A, es decir, que en los resultados de esta composición se presenta mayor concentración de arsénico en el lixiviado indicando que "C" y "B" presentan una mejor absorción de arsénico.

Finalmente se realizó una propuesta para la disposición de jales en cavidades mineras tomando como caso de estudio residuos de extracción metálica en una presa



ubicada en Zimapán-Hidalgo, México, considerando su composición física y química, así como una previa caracterización y estabilización mediante la elaboración de especímenes evaluados en CMS, intemperismo acelerado y lixiviación. En respuesta a lo anterior se tuvo que todos los tratamientos propuestos presentan concentraciones de plomo y arsénico por debajo del LMP en la lixiviación, así mismo la capacidad de carga dependerá del uso al que estará destinado el relleno, siendo este meramente disposición final o bien como muro de carga, con base en ello, se propone aquel tratamiento con mayor cantidad de jales y menor cantidad de agregados que cumpla con las capacidades de carga correspondiente, haciendo el proceso económicamente viable.



Referencias

Barraza T. L.A. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental de la UNAM. Evaluación de la contaminación del suelo por arsénico, plomo y mercurio en la zona de Presa de Jales de mina la Prieta en Hidalgo del Parral, Chihuahua, noviembre de 2015.

Benzaazoua, M., Marion, P., Picquet, I., & Bussière, B. (2004). The use of pastefill as a solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage. *Minerals engineering*, 17(2), 233-243.

Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M., Fried, É. & Blier, A. (2008). Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals engineering*, 21(4), 330-340.

Comisión Nacional del Agua (CNA), 2000. Manual de Presas de Jales: México, Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas, 120 p.

Cruz, R., Méndez, B. A., Monroy, M., & González, I. (2001). Cyclic voltammetry applied to evaluate reactivity in sulfide mining residues. *Applied Geochemistry*, 16(14), 1631-1640.

DOF (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. 23 de abril de 1993.

DOF (2004). Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. 13 de septiembre de 2004.

DOF (2007). Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 Que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio cromo hexavelnte, mercurio, niquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. 2 de marzo de 2007.



DOF (2006). Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. 23 de junio de 2006.

DOF (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007, Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata. 15 de enero de 2010.

DOF (2011). Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. 30 de agosto de 2011.

DOF (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-159-SEARNAT-2011, Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre. 13 de febrero de 2012.

EPA. (1996). Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils. En línea. Recuperado el 23 de septiembre de 2017, disponible en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>

Escobar, J. M. M., & Betancur, E. O. (2014). "Legislación colombiana de cierre de minas. ¿Es realmente necesaria?". Boletín de Ciencias de la Tierra, (34), 51-62, [S.l.], n. 34, p. 51-62, jul. 2013. ISSN 2357-3740. Fecha de acceso: 16 oct. 2017 En línea, recuperado de: <<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/40680/45864>>.

Fall, M., Benzaazoua, M., & Saa, E. G. (2008). Mix proportioning of underground cemented tailings backfill. Tunnelling and Underground space technology, 23(1), 80-90.

Gaceta Oficial del Distrito Federal (2004). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería. En línea. Recuperado el 15 de septiembre de 2017. Disponible en: <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/745.pdf>

González M. A. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental de la UNAM. Inmovilización de sustancias peligrosas a través de solidificaciones monolíticas con diferentes materiales, julio de 2012.



González S. J. F. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental de la UNAM. Propuesta para el aprovechamiento de residuos metalúrgicos no ferrosos, septiembre 2016

Gutiérrez-Ruiz, M, Romero F. M., & González-Hernández, (2007). Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 24(2), 170-184. Recuperado en 02 de mayo de 2016, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742007000200005&lng=es&tlng=es

Henríquez, C; Cabalceta, G. (2012). Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con enfoque agrícola. 2da ed. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, San José Costa Rica. UCR/CIA-ACCS. 60 P.

Hernández Ruíz G. M.L. & Padilla C. C.M. Tesis de Licenciatura en Química de la UNAM. Movilidad ambiental de metales en residuos mineros de la región de Zimapán, Hidalgo. 2010.

Higueras P., Oyarzun R., Lillo J. (2011). Minería ambiental, una introducción a los impactos y su remediación. Consultado el 25 de mayo de 2018 (En línea). Recuperado de: https://eprints.ucm.es/14046/1/Libro_Mineria_MA.pdf

Instituto Nacional de Ecología. (2007). Industria minera. [Www2.inecc.gob.mx](http://www2.inecc.gob.mx). (En línea) Revisado el 10 de noviembre de 2016, recuperado de: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/16/parte3_12.html#top

Instituto Nacional de Ecología. (2007). Los residuos en la minería mexicana. [Www2.inecc.gob.mx](http://www2.inecc.gob.mx). (En línea) Revisado el 9 de noviembre de 2016, recuperado de: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/35/los_residuos.html#top

INECC (2004). Evaluación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales. (En línea) Recuperado el 22 de septiembre de 2016, de: http://www2.inecc.gob.mx/dgcnica/descargas/metales_ei2004.pdf

INEGI. (2010). Minería. Economía. [En línea]. Recuperado el 4 de mayo de 2016 Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/secundario/mineria/default.aspx?tema=E>

Investigación Hidrogeológica e Hidrogeoquímica en Zonas Mineras del Ecuador – Instituto nacional de investigación Geológico Minero Metalúrgico.



(2016). Geoinvestigacion.gob.ec. (En línea). Revisado el 10 noviembre de 2016, recuperado de: <http://www.geoinvestigacion.gob.ec/investigacion-hidrogeologica-e-hidrogeoquimica-en-zonas-mineras-del-ecuador/>

La Jornada (2013). Perecen dos mineros por derrumbe en Hidalgo. Jornada.unam.mx. (En línea) Revisado el 10 de noviembre de 2016, recuperado de: <http://www.jornada.unam.mx/2013/07/23/estados/031n2est>

Ledesma, R. M. P., Arroyo, Y. R. R., & Grabach, C. S. (2004). Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México: Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(2), 268-284.

Ley General Para La Prevención y Gestión Integral De Los Residuos. Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003. Texto Vigente. Última reforma publicada DOF 22-05-2015

Mejía Z. F., Valenzuela G.J.L., Aguayo Salinas S., & Meza F. D. (2009). Adsorción de arsénico en zeolita natural pretratada con óxidos de magnesio. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(4), 217-227.

Moreno T. R., Téllez H. J., y Monroy F. M. G. (2012). Influence of minerals from the tailings in the bioaccessibility of arsenic, lead, zinc and cadmium, in the mining district Zimapán, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(3), 203-218.

Municipio Zimapán Hidalgo México (2016). Zimapan.gob.mx. (En línea) Revisado el 10 noviembre de 2016, recuperado de: http://www.zimapan.gob.mx/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=101

Niroshan, N., Sivakugan, N., & Veenstra, R. L. (2017). Laboratory study on strength development in cemented paste backfills. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7), 04017027.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. Norma Mexicana NMX-C159-ONNCCE-2004, Concreto-Elaboración y Curado de Especímenes en el laboratorio. En línea. Revisado el 15 de septiembre de 2017. Recuperado de: <http://www.imcyc.com/revistacyt/pdfs/problemas50.pdf>



PROFEPA (2013). Control de Residuos Peligrosos. Profepa.gob.mx. (En línea) Revisado el 9 de noviembre de 2016, recuperado de: http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/1370/1/mx/control_de_residuos_peligrosos.html

Pulido, A. B. (2007). Nociones de Hidrogeología para ambientólogos. Almería: Editorial Universidad de Almería.

R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

Romero E. L., Vargas C. M. y Padilla B. F. (2007) "Desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización/ solidificación de desechos peligrosos en Costa Rica. Estudio de caso en lodo de electrodeposición", Avances en Química, año/vol. 2, núm. 003 Universidad de los Andes Mérida, Venezuela pp. 9-14.

Ruíz R. E., y Martínez S. M. (2015). Hidrología aplicada: Modelos hidrogeoquímicos. (En línea) Revisado el 10 de noviembre de 2016, recuperado de:

https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/4577/mod_resource/content/1/Material_Docente/Tema_6_Modelos_V2.pdf

Saavedra Silva, Elvira Eva, & Sánchez Salazar, María Teresa. (2008). Minería y espacio en el distrito minero Pachuca-Real del Monte en el siglo XIX. Investigaciones geográficas, (65), 82-101. Recuperado en 19 de agosto de 2018, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000100007&lng=es&tlng=es.

Sánchez Gómez, F., & Reséndiz Vázquez, A. (2016). Viviendas sobre cavernas subterráneas artificiales: una construcción social del riesgo. Caso Atizapán de Zaragoza, Estado de México. Investigación y Ciencia, 24 (68), 48-59.

Secretaría de Economía. (2016). Minería. gob.mx. (En línea) Revisado el 10 de noviembre de 2016, recuperado de: <http://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>

Secretaría de recursos Hidráulicos. (1967). *Instructivo para concreto*. Departamento de Ingeniería Experimental. 321 pág. México.

SEMARNAT (2002) Guía para la presentación de la manifestación de impacto ambiental, Minero, Modalidad: particular. ISBN 968-817-531-5. (En línea)



Recuperado el 17 de enero de 2018. Disponible en:
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/121006/Guia_MIA
Particular_Minero.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/121006/Guia_MIA_Particular_Minero.pdf)

SEMARNAT (2014). Guía para conocer los principales trámites y permisos ambientales en las diferentes etapas del proceso minero. (En línea) recuperado el 17 de enero de 2018. Disponible en:
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31184/principales_tr_mites_y_per
misos_ambientales_en_el_proceso_minero.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31184/principales_tr_mites_y_permisos_ambientales_en_el_proceso_minero.pdf)

SEMARNAT (2012). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. México. 2013.

SEMARNAT. (2015). Residuos Peligrosos. Semarnat.gob.mx. (En línea) Revisado el 9 de noviembre 2016, recuperado de:
[http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/materiales-y-actividades-
riesgosas/residuos-peligrosos](http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/materiales-y-actividades-riesgosas/residuos-peligrosos)

SEMARNAT (2015) “Guía para conocer los principales trámites y permisos ambientales en las diferentes etapas del proceso minero”. Semarnat.gob.mx. Revisado el 27 de mayo de 2017, (En línea). Recuperado de:
[http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/fomento/documentos/2
014/guia-minas.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/fomento/documentos/2014/guia-minas.pdf)

Servicio Geológico Mexicano (2016). “Panorama Minero del Estado de Hidalgo” Sgm.gob.mx. Revisado el 16 de mayo del 2017, (En línea) Recuperado de:
<http://www.sgm.gob.mx/pdfs/HIDALGO.pdf>

Tomás R., Herrera G., Delgado J., Peña F. (2009) Subsistencia del terreno. Enseñanza de las ciencias de la tierra. Vol. 17, pág. 295-302. Universidad de Girona (2009). Revisado el 28 de mayo de 2017, (En línea) Recuperado de:
<http://www.raco.cat/index.php/ect/article/viewFile/199932/267375>

Volke Sepúlveda, T., Velasco Trejo, J. A., Rosa Pérez, D. A., & Tania Volke Sepúlveda, J. A. V. (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación (No. 363.7396 V6S8). Instituto Nacional de Ecología. Revisado el 26 de mayo de 2017, (En línea). Recuperado de:



[http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/B1E761B1E2F24A5C05257D490070F94F/\\$FILE/SuelosContaminadosPorMetalesYMetaloides.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/B1E761B1E2F24A5C05257D490070F94F/$FILE/SuelosContaminadosPorMetalesYMetaloides.pdf)

Yilmaz, E., y Fall, M. (Eds.). (2017). *Paste tailings management* (pp. 978-3). Springer International Publishing.



ANEXOS

Parte de los resultados obtenidos en este trabajo se presentaron en modalidad de cartel a nivel Maestría obteniendo el segundo lugar en el VIII Congreso de la AMEQA Toluca, Edo. De Méx. llevado a cabo del 8 al 10 de agosto de 2018.



AMEQA

Comité Científico AMEQA / SETAC-México 2018.

La Asociación Mesoamericana de Ecotoxicología y Química Ambiental A.C., certifica que:

Gutiérrez Bazán José Juan

1. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México
2. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México

Asistió al VIII Congreso de la AMEQA Toluca,
Edo. De Méx., 8 al 10 de agosto de 2018. Donde
presentó en formato **cartel** el trabajo:

Propuesta para la utilización de jales cementados como relleno en minas

De los autores:

Gutiérrez Bazán J. J.¹
Fernández Villagómez G.¹
Gavilán García I. C.²
Sánchez Pérez F.¹

Dra. Guadalupe Barrera Escordia,
Presidenta de AMEQA.

c.c.p. Dra. Patricia Ramírez Romero, Secretaria de AMEQA.
c.e.p. Dra. Juan Carlos Sánchez Meza, Responsable de la organización en la sede.
c.c.p. Dra. Yochitli Guzmán García, Tesorera de AMEQA.
c.c.p.

Archivo

Río Parral No.65 Col. Paseos de Churubusco, CP 09030, Del. Iztapalapa, Cd. de México. Página Internet:
<http://www.ameqa.org> Email: ameqa@ameqa.org Tel. 52-55-5804-6493, Fax 52-55-5804-4738



De la misma forma los resultados serán expuestos en modalidad oral en el XXXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Asociación De Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS), que se llevará a cabo del 28 al 31 de octubre del 2018 en Guayaquil, Ecuador.



XXXVI CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

"En vía al desarrollo sostenible"

Ecuador, Guayaquil a 24 de mayo de 2018

JOSÉ JUAN GUTIÉRREZ BAZÁN
PRESENTE


Estimado Autor/a

Por este medio le informamos que su trabajo técnico titulado "POTENCIALIDAD DE LOS JALES COMO RELLENO EN CAVIDADES MINERAS. CASO DE ESTUDIO: ZIMAPÁN-HIDALGO, MÉXICO" con el ID 0037 ha sido considerado como **aceptado** para ser presentado con la **MODALIDAD ORAL** en el XXXVI CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL de la ASOCIACIÓN DE INGENIERA SANITARIA Y AMBIENTAL (AIDIS), a celebrarse del 28 al 31 de octubre del 2018 en Guayaquil, Ecuador.

Sin embargo, como se indica en el "Reglamento de Presentación de Trabajos Técnicos", para que el artículo aceptado no se anulado, la inscripción al congreso deberá ser pagada por al menos uno de los autores, con una fecha límite del 31 de julio 2018, en caso de no haber realizado el pago correspondiente antes de la fecha indicada, el trabajo será retirado del programa y de las Memorias del Congreso.

Sin otro particular, le reitero a usted nuestras felicitaciones. Quedamos a sus órdenes al correo de congresoaidis@aidisnet.org.


Mg. Walter Bazaña Loo
Presidente AEISA


Dra. Pilar Tello E.
Presidenta AIDIS


Nelson Olaya, M. Sc.
Dir. Gral. Del XXXVI Congreso AIDIS